

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS BASE CR Y NI EN ACERO AISI 4130 DE
TREN DE ATERRIZAJE DE LA AERONAVE A-37B DE LA FUERZA AÉREA
COLOMBIANA

PRESENTADO POR:

ANDREA CAROLINA GÓMEZ RUGE

CÓDIGO: 1053336910

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA, RISARALDA

2020

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS BASE CR Y NI EN ACERO AISI 4130 DEL
TREN DE ATERRIZAJE DE LA AERONAVE A-37B DE LA FUERZA AÉREA
COLOMBIANA

PRESENTADO POR:

ANDREA CAROLINA GÓMEZ RUGE

CÓDIGO: 1053336910

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

ING. MS. PHD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

COASESOR

ING. MS. PHD. CITLALLI GAONA TIBURCIO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA, RISARALDA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme en cada paso que doy, a mi Madre y mi Hermana que están incondicionalmente apoyándome en todos los proyectos, por forjarme como la persona que soy, todos mis logros se los debo a ustedes incluyendo este, a mi Padre que desde el cielo guía mi camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme alcanzar este logro, a mi Madre y mi Hermana siempre incondicionales en mi vida, al Doctor José Luis Tristancho, Director de mi trabajo de grado, quien fue un gran apoyo durante el proceso, a la Fuerza Aérea Colombiana, a la Universidad Tecnológica de Pereira y sus docentes en particular al profesor Ricardo López y al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica en cabeza de la Doctora Citlalli Gaona de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey (México).

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. GENERALIDADES	13
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. HIPOTESIS.....	15
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1. Antecedentes.....	16
2.1.1 Recubrimiento del Cadmio	21
2.1.2 El cadmio y posibles sustitutos.....	24
2.2 Marco conceptual	29
2.2.1 Aeronave militar	29
2.2.2. Tren de aterrizaje	30
2.2.3. Corrosión.....	31
2.3. Marco Teórico.....	44
2.3.1 Técnicas para caracterización	44
2.3.1.1. <i>Microscopia electrónica de barrido MEB-EDX</i>	44
2.3.2. Técnicas Electroquímicas.....	47
2.3.2.1. Resistencia a la polarización lineal (RPL)	47
2.3.2.2. <i>Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)</i>	49
2.3.2.3. <i>Curvas de polarización potenciodinámicas</i>	53
2.3.2.4. <i>Ruido electroquímico</i>	56
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	58
3.2. Etapas metodológicas.....	59
3.2.1. Etapa 1	59
3.2.2. Etapa 2	61
3.2.3. Etapa 3.....	64
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
4.1. Caracterización mediante análisis metalográfico los recubrimientos con Cd(I-II), Cr y Ni en las probetas de acero 4130.....	66

4.2. Aplicación de las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal, curvas polarización potenciodinámicas, espectroscopia de impedancia electroquímica y ruido electroquímico, a las probetas de acero 4130 con los recubrimientos de Cd (I-II), Cr y Ni a temperatura ambiente para determinar la velocidad de corrosión.....	76
4.2.1. Ruido Electroquímico	76
4.2.2. Resistencia a la polarización lineal.....	87
4.2.3. Curvas de polarización.....	90
4.2.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.....	93
4.2.5. Microscopia Óptica - Análisis Superficial.....	100
4.3. Comparación de la velocidad de corrosión, mecanismos de reacción, relación entre la interface electrodo y electrolito, así como las características microestructurales, de los recubrimientos base Cd(I-II), Cr y Ni.	104
5. CONCLUSIONES.....	107
6. RECOMENDACIONES	108
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Principales usos del cadmio, mercurio y plomo	23
Tabla 2 Composición AISI 4130.....	59
Tabla 3 Nomenclatura de muestras	60
Tabla 4 Nomenclatura de muestras	66
Tabla 5 Parámetros electroquímicos para H ₂ O a partir de RPL.....	87
Tabla 6 Parámetros electroquímicos para H ₂ SO ₄ a partir de RPL.....	88
Tabla 7 Parámetros electroquímicos para NaCl a partir de RPL.	88
Tabla 8 Resumen de características microestructurales y electroquímicas para los recubrimientos Cd, Cr y Ni.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tren de aterrizaje A-37B.....	19
Figura 2 Condiciones de superficie recubierta con Cadmio.....	20
Figura 3. El Cadmio y la salud	22
Figura 4. Aeronave A-37B Fuerza Aérea Colombiana.....	30
Figura5. Tren de aterrizaje aeronave A-37B.....	30
Figura6. Celda Electrolítica	32
Figura7. Tipos de señales emitidas por la muestra en el SEM tras la interacción con el haz de electrones	45
Figura8. Diagrama de Resistencia a la Polarización.....	48
Figura9. Diagrama de Nyquist y circuito equivalente	52
Figura10. Diagrama de Bode de un circuito eléctrico simple	52
Figura11. Curva de Polarización Potenciodinámica.....	54
Figura12. Polarización anódica de un acero.....	55
Figura13. (a) Muestra sección transversal. (b) Muestra superficial.....	60
Figura14. Pulidora metalografica	61
Figura15. Microscopio electrónico de barrido	61
Figura16. Potenciostato GillAC.....	63
Figura17. Celda electroquímica.	63
Figura18. Estereoscopio.	64
Figura19. Recubrimiento Cadmio tipo I con electrones retro dispersados BES M1.	67
Figura20. Recubrimiento Cadmio tipo I con electrones secundarios SEI M1.....	67
Figura21. Microanálisis por dispersión de rayos M1	68
Figura22. Porcentaje de elementos M1	68
Figura23. Recubrimiento Cd Tipo I BES M2	68
Figura24. Recubrimiento Cd Tipo I SEI M2.....	68
Figura25. Microanálisis por dispersión de rayos M2	69
Figura26. Porcentaje de elementos M2	69
Figura27. Recubrimiento Cd Tipo II imagen BES M3.....	69
Figura28. Recubrimiento Cd Tipo II imagen SEI M3	69
Figura29 Microanálisis por dispersión de rayos M3	70
Figura30. Porcentaje de elementos M3	70
Figura31 Recubrimiento Cd Tipo II BES M4	70
Figura32 Recubrimiento Cd Tipo II SEI M4.....	70
Figura33. Microanálisis por dispersión de rayos M4	71
Figura34. Porcentaje de elementos M4	71
Figura35. Espesor recubrimiento Cr M5	71
Figura36 Recubrimiento Cr vs sustrato M5.....	71
Figura37. Microanálisis por dispersión de rayos M5	72
Figura38. Porcentaje de elementos M5	72
Figura39. Recubrimiento de Cr BES M6.....	73

Figura40. Recubrimiento de Cr SEI M6	73
Figura41. Microanálisis por dispersión de rayos M6	73
Figura42. Porcentaje de elementos M6	73
Figura43 Sección Transversal M7 BES	74
Figura44 Sección transversal M7 SEI	74
Figura45. Microanálisis por dispersión de rayos M7	74
Figura46. Porcentaje de elementos M7	74
Figura47. Recubrimiento Ni BES M8	75
Figura48. Recubrimiento Ni SEI M8.....	75
Figura49. Microanálisis por dispersión de rayos M8	75
Figura50. Porcentaje de elementos M8	75
Figura51. Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en H ₂ O.	76
Figura52. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en H ₂ O.....	77
Figura53. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en H ₂ O	78
Figura54. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en H ₂ O	78
Figura55. Series de tiempo de potencial y corriente para Ni en H ₂ O	79
Figura56. Series de tiempo de potencial y corriente para Cr en H ₂ O.....	79
Figura57 Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en H ₂ SO ₄	80
Figura58. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en H ₂ SO ₄	80
Figura59. Series de tiempo de potencial y corriente para AISI 4130 en H ₂ SO ₄ ...	81
Figura60 Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en H ₂ SO ₄	81
Figura61. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en H ₂ SO ₄	82
Figura62. Series de tiempo de potencial y corriente para Níquel en H ₂ SO ₄	82
Figura63. Series de tiempo de potencial y corriente para cromo en H ₂ SO ₄	83
Figura64. Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en NaCl	84
Figura65. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en NaCl	84
Figura66. Series de tiempo de potencial y corriente para AISI 4130 en NaCl	85
Figura67. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en NaCl.....	85
Figura68. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en NaCl.....	86
Figura69. Series de tiempo de potencial y corriente para Ni en NaCl.....	86
Figura70. Series de tiempo de potencial y corriente para Cr en NaCl	87
Figura71. Resistencia a la polarización lineal (RPL) para los diferentes sistemas en H ₂ O, NaCl y H ₂ SO ₄	89
Figura72. Velocidades de corrosión para todos los sistemas en H ₂ O, NaCl y H ₂ SO ₄	90
Figura73. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en H ₂ O	90
Figura74. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en H ₂ SO ₄	91
Figura75. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en NaCl.....	92
Figura76. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en H ₂ O	93
Figura77. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en H ₂ O	94

Figura78. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en H ₂ O	94
Figura79. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en H ₂ SO ₄	95
Figura80. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en H ₂ SO ₄	96
Figura81. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en H ₂ SO ₄	96
Figura82. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en NaCl.....	97
Figura83. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en NaCl	99
Figura84. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en NaCl	99
Figura85. Recubrimiento Cadmio Tipo I (Aumento a 20X).....	100
Figura86. Recubrimiento Cadmio Tipo I. Aplicación técnicas electroquímicas en H ₂ O y NaCl.....	101
Figura87. Recubrimiento Cadmio Tipo II (Aumento a 50X).....	101
Figura88. Recubrimiento Cadmio tipo II. Aplicación Técnicas electroquímicas en H ₂ O y NaCl.....	102
Figura89. Recubrimiento Cromo (Aumento a 50X).....	102
Figura90. Recubrimiento Cromo. Aplicación técnicas electroquímicas en H ₂ O y NaCl.....	103
Figura91. Recubrimiento Níquel (Aumento a 20X).	103
Figura92. Recubrimiento Níquel. Aplicación de técnicas electroquímicas en H ₂ O y NaCl.....	104

RESUMEN

Durante el desarrollo de la presente investigación se pretendió evaluar los recubrimientos metálicos de Cromo y Níquel aplicados mediante electrodeposición a un acero AISI 4130, con el fin de proponerlos como sustitutos del recubrimiento de Cadmio utilizado en componentes aeronáuticos como el tren de aterrizaje de la aeronave A-37B de la Fuerza Aérea Colombiana.

En primera medida se caracterizaron cada uno de los recubrimientos, mediante la microscopia electrónica de barrido, identificando su topografía, estructura cristalográfica y composición. Posteriormente se aplicaron técnicas electroquímicas como, ruido electroquímico, resistencia a la polarización lineal, curvas de polarización cíclicas y espectroscopia de impedancia electroquímica, en tres medios corrosivos. Finalmente se realizó una comparación de cada recubrimiento de las principales propiedades microestructurales y electroquímicas, y de su respuesta a cada prueba realizada.

Como resultado se evidenció que los recubrimientos de Cromo y Níquel tienen una morfología de la microestructura muy favorable respecto a la del Cadmio que presenta irregularidades, y respecto a la respuesta de las pruebas en los diferentes medios corrosivos, el Cromo y Níquel presenta una baja velocidad de corrosión, se pasivan en algunos medios, sin embargo, el recubrimiento de Níquel presenta susceptibilidad a la corrosión localizada.

PALABRAS CLAVE: Corrosión, Recubrimiento metálico, Cadmio, Cromo, Níquel, Industria aeronáutica.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) como institución del Estado conduce operaciones aéreas ejerciendo el dominio y control de espacio aéreo colombiano para defender la soberanía de nuestro país, en cumplimiento de la misión constitucional consagrada en el artículo 217 de la Constitución Política Colombiana de 1991¹. Es así como se materializa la misión a través del Plan Estratégico 2011-2030, en él, la FAC² establece unos objetivos estratégicos encaminados a cumplir la misión constitucional, como “fortalecer la capacidad operacional a fin de contribuir al logro de los fines del Estado, y propender por tener el mejor talento humano, un desarrollo científico, tecnológico y cultural”, los cuales permiten que día a día el personal de la Institución ponga a disposición todos las capacidades para liderar procesos de generación y transmisión de conocimiento que aporten a la solución de necesidades de esta.

El desarrollo de la presente investigación se realizó en el tren de aterrizaje de la aeronave de combate Cessna A-37B, específicamente en el estudio del recubrimiento metálico del mencionado componente, dados los ambientes corrosivos a los cuales está expuesto. La aeronave de estudio opera principalmente en el Comando Aéreo de Combate No. 3, Base Aérea ubicada en Malambo – Atlántico que es una zona costera por lo que su concentración salina en el ambiente es bastante alta.

En la industria aeronáutica militar, se realizan procesos y protocolos de mantenimiento en las aeronaves que permitan mantener el equipo en condiciones óptimas para la operación, cabe resaltar que dichos procesos son rigurosos y exigentes debido a la importancia de las operaciones aéreas que realizan. Las aeronaves Cessna A-37B son sometidas a diferentes tipos de mantenimiento de acuerdo con las horas de operación establecidas por la casa fabricante, es por este motivo que se programan tareas de mantenimiento con el fin de evitar cualquier desgaste o falla en el equipo, como lo establece el Mensaje Técnico 914 emitido por la Fuerza Aérea Colombiana.

Actualmente las aeronaves A-37B utilizan Cadmio como recubrimiento metálico en los trenes de aterrizaje de acero 4130, para aumentar la resistencia a la corrosión

¹ ASAMBLEA NACIONAL CONSTITUYENTE. Constitución Política de Colombia: Capítulo VII De la Fuerza Pública. Bogotá D.C.: Asamblea Nacional Constituyente, 1991, p. 74.

² FUERZA AÉREA COLOMBIANA. Objetivos institucionales y líneas de acción estratégicas. En: Plan Estratégico Institucional 2011-2030. Bogotá D.C.: Exprecard's C.I. S.A.S., 2010, p. 50.

y desarrollar ciertas propiedades físicas en las superficies de los componentes que permiten retrasar de manera significativa el desarrollo de corrosión. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la Fuerza Aérea Colombiana emitió un Mensaje Técnico en el que las tareas recurrentes de mantenimiento son más periódicas en ambientes salinos, adicionalmente, el Cadmio es un metal altamente tóxico que puede afectar al personal que trabaja en los procesos de mantenimiento de las aeronaves.

La utilización del Cadmio en la industria, según García Martínez³, ha originado diversos estudios sobre su impacto, lo que llevó a su prohibición en la industria de automoción y aparatos eléctricos y electrónicos, así mismo, a nivel internacional se restringe el uso del Cadmio según las normas REACH (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)⁴ en Europa, y la USEPA (US Environmental Protection Agency)⁵ en los Estados Unidos.

Por lo anterior se pretendió evaluar los recubrimientos base Cr-Ni con la intención de plantear este recubrimiento como alternativa, para la protección contra la corrosión generada por la exposición a ambientes salinos de componentes aeronáuticos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la corrosión en el acero 4130 con recubrimientos base Cd (I-II*), Cr y Ni, empleando técnicas electroquímicas, en presencia de electrolitos como NaCl al 3,5%, H₂O y H₂SO₄ al 1%.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar mediante análisis metalográfico los recubrimientos con Cd(I-II), Cr y Ni en las probetas de acero 4130.
- Aplicar las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal, curvas polarización potenciodinámicas, espectroscopia de impedancia

³ GARCÍA MARTÍNEZ, María. Desarrollo de recubrimientos base aluminio mediante MOCVD para protección frente a la corrosión y a la oxidación. Madrid. 2013. p. 12. Trabajo de investigación (Doctorado en Materiales). Universidad Complutense de Madrid. Facultad De Ciencias Químicas.

⁴ UNIÓN EUROPEA, Consejo. REACH (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Reino Unido. 2006. Reglamento (UE), N°1, 1907/2006.

⁵ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Risk and Technology Review for National Emission Standards for Aerospace Manufacturing and Rework Facilities. US: Environmental Protection Agency. 2017. EPA-HQ-OAR-2014-0830.

electroquímica y ruido electroquímico, a las probetas de acero 4130 con los recubrimientos de Cd (I-II), Cr y Ni a temperatura ambiente para determinar la velocidad de corrosión.

- Comparar la velocidad de corrosión, mecanismos de reacción, relación entre la interface electrodo y electrolito, así como las características microestructurales, de los recubrimientos base Cd(I-II), Cr y Ni.

1.3. HIPOTESIS

El Recubrimiento de Cromo presenta alta resistencia a la corrosión localizada en un ambiente salino, al ser evaluado en la prueba electroquímica de curvas de polarización potenciodinamica.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ANTECEDENTES

En el desarrollo constante de los diferentes campos de la industria se han utilizado materiales con el objetivo de mejorar la calidad de vida del hombre, sin embargo, dichos materiales con el tiempo presentan desgaste y degradación por su uso, según el Fondo de Cultura Económica de México⁶, especialmente los metales que, aunque son un actor importante en el desarrollo y avance de las civilizaciones, su desgaste afecta directamente sus propiedades y desempeño.

Por tal razón, es una prioridad para la industria evitar la corrosión, causa por la cual los metales regresan a su estado natural, es decir un estado de menor energía, y que representa pérdidas económicas significativas; George F. Hays⁷ menciona que actualmente el 30 % de la producción mundial de hierro y acero se pierde en la corrosión. Aproximadamente, más del 3 % anual del PIB mundial, corresponde a suplir los gastos ocasionados por la corrosión, el gobierno y las industrias en general no le dan mucha importancia a este problema, salvo industrias como la aeronáutica que tienen unas exigencias muy estrictas que obligan a seguir determinados procedimientos para disminuir el impacto de la corrosión por el riesgo al que se enfrenta.

En la industria aeronáutica, Gaona Tiburcio⁸ afirma que, el tema de la corrosión siempre va a ser crucial por la incidencia en la disponibilidad y envejecimiento de las aeronaves, además de la seguridad en vuelo que de no ser controlada puede conducir a fallas catastróficas. Teniendo en cuenta que la seguridad es un factor muy importante, las casas fabricantes de aeronaves deben asegurarse de que, en las etapas de la fabricación de cada componente, se implementen procesos óptimos para reducir cualquier riesgo y aumentar la vida útil, dando una alta confiabilidad de operación de la aeronave, como es el caso de los procesos de protección contra la corrosión para los componentes metálicos.

Particularmente, la industria aeronáutica se ha visto afectada por el fenómeno de la corrosión causando accidentes fatales como el caso analizado por Jonnes⁹ y

⁶ FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. Mas allá de la Herrumbre. Segunda reimpresión. Ciudad de México. Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA). 1996.

⁷ GEORGE F. Hays. Now is the time. World corrosion organization- publications. {En línea}. {03-11-2019}. Disponible en: http://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications/_nowisthetime.pdf.

⁸ GAONA, Tiburcio, *et al.* Corrosión en la Industria Aeroespacial. En: VALDEZ SALAS, B, & SCHORR WIENER, M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience, 2013, pp. 33-48.

⁹ JONNES, Denny A. Principles and prevention of corrosion. Second Edition. Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada. Reno: Prentice-hall.inc, 1996.

Komorowski¹⁰, del vuelo 243 de Aloha Airlines en 1988, un Boeing 737-297, en el que se desprendió una sección de la parte superior del fuselaje. Luego de la investigación del accidente, se determinó que una de las causas fue los signos de corrosión-fatiga en las juntas de las placas de aluminio que conforman el fuselaje, las cuales son unidas por un adhesivo y remaches, pero al ser sometidas a un sobre esfuerzo, la unión se debilitó y fue afectada por las condiciones ambientales dependiendo únicamente de la unión de los remaches, que no soportaron la presurización de la aeronave en vuelo.

Dados los estándares de calidad tan estrictos que exige la industria aeronáutica, se requiere que haya un mejoramiento constante de las características críticas de los componentes de las aeronaves para que sean capaces, según Ung Hing Tiong¹¹, de soportar las condiciones extremas como ciclos térmicos, altos niveles de radiación ultravioleta y carga mecánica. En las aeronaves hay componentes que requieren especial atención, por su importancia en vuelo, como las juntas mecánicamente fijadas las cuales deben ser protegidas para prevenir la aparición de corrosión, porque representa arreglos de alto costo o en el peor de los casos afecta la seguridad de vuelo.

Gran parte de los materiales utilizados en la fabricación de una aeronave están expuestos a la corrosión, y se manifiesta de diferentes maneras, ya sea sobre una superficie completa o puede ser un ataque localizado generando picaduras profundas. En la industria aeronáutica, según Gaona¹², las cargas externas en la estructura metálica y el ambiente atmosférico son un conjunto que pueden ocasionar agrietamiento en el material por tensión y fatiga, como ocurrió en el Aloha Airlines, siendo estos dos factores muy frecuentes en la operación de una aeronave.

La Fuerza Aérea Colombiana tiene presencia en todo el territorio colombiano, por lo que cuenta con bases aéreas en diferentes partes del país, una de las unidades más importantes por su ubicación estratégica es el Comando Aéreo de Combate No. 3 (CACOM 3) ubicado en el municipio de Malambo, Atlántico. Allí cuenta con diferentes tipos de aeronaves para operar en el momento que se requiera, con el fin de defender el espacio aéreo colombiano. Entre ellas, cuenta con la flota de Aeronaves A-37B, avión de combate de origen estadounidense de la empresa Cessna Aircraft Company.

Las aeronaves A-37B operan a nivel nacional, sin embargo, su base de operación es el CACOM 3, que está expuesta a ambientes corrosivos agresivos para los

¹⁰ KOMOROWSKI, J.P., *et al.* Quantification of corrosion in aircraft structures with double pass retroreflection. En: Canadian Aeronautics and space journal. Canadá: Vol 42. No.2. June, 1996. pp. 76-82.

¹¹ UNG HING TIONG & GRAHAM, Clark. The structural environment as a factor affecting coating failure in aircraft joints. En: Procedia Engineering. Netherlands: No.1, Vol 2, 2010, pp. 1393-1401.

¹² GAONA TIBURCIO. Op. Cit., p. 37.

componentes aeronáuticos vitales para su funcionamiento. El grupo técnico, encargado del mantenimiento de las aeronaves, según Moreno¹³ aplica los protocolos y políticas establecidos por las órdenes técnicas de la empresa, que tienden reducir el efecto de la corrosión en la operación, como el Manual técnico TO 1-1-691, donde se establecen los lineamientos del programa de prevención y control de corrosión incluyendo limpieza exhaustiva, inspección, preservación y lubricación en unos lapsos de tiempo específicos de acuerdo con el mantenimiento preventivo y el programa de inspección y corrosión de determinadas áreas de la aeronave.

El programa de mantenimiento preventivo establecido por la US Air Force¹⁴ incluye actividades como: lavado regular de aeronaves programado, limpieza programada regularmente de superficies como el tren de aterrizaje (Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), mantener abiertos los desagües, inspección, eliminación y reaplicación de compuestos preventivos de corrosión de forma programada, detección temprana y reparación de recubrimientos; para estas actividades se establecen tablas de frecuencias de acuerdo con la localización de la base de operación, en el caso de ambiente salino se considera un ambiente grave y la frecuencia de lavado es mayor.

Para estos casos de ambiente salino, la US Air Force¹⁵ establece que en las pistas que están a menos de 3000 pies sobre el nivel del mar, si la aeronave realiza dos o más despegues y aterrizajes, se debe realizar un lavado con agua limpia cuando se complete el último vuelo del día.

La US Air Force¹⁶ sostiene que, el tren de aterrizaje es el componente que está más expuesto que cualquier otra parte de la aeronave, ya que se ve afectado por el agua pulverizada, barro, sal, otros agentes de deshielo de la pista, grava, desechos voladores de las pistas durante los despegues y aterrizajes, especialmente los ubicados cerca a la costa como en el caso del A-37B, expuesto a aire salado y a la pulverización. Esta parte de la aeronave es muy sensible a la corrosión pese a los recubrimientos que se aplican a todos los accesorios y ensamblajes que lo componen.

¹³ MORENO LEMOS, Abelardo. Programa de envejecimiento aeronaves FAC. 2000. {En línea}. {26-11-2019}. Disponible en:

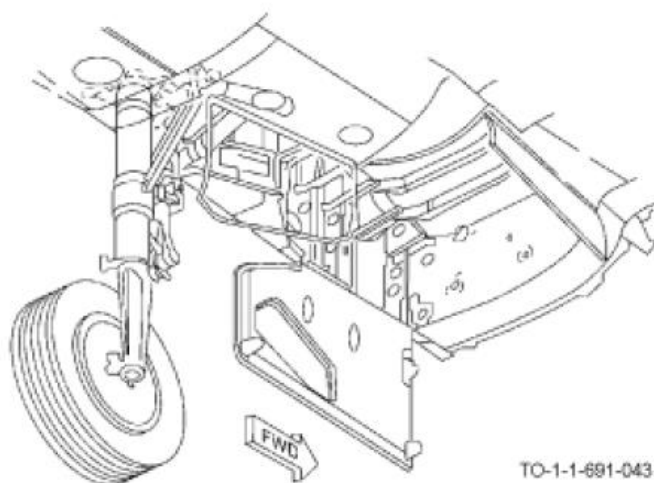
https://www.researchgate.net/publication/281902343_Programa_envejecimiento_aeronaves_FAC

¹⁴ US AIR FORCE. Technical manual Cleaning and corrosion prevention and control, aerospace and non-aerospace equipment. US: US Air Force, 2009, p. 45. TO 1-1-691.

¹⁵ US AIR FORCE. Ibid., p 52.

¹⁶ US AIR FORCE. Ibid., p 122.

Figura 1 Tren de aterrizaje A-37B



Fuente: US Air Force, TO-1-1-691.

En los ambientes corrosivos, según la US Air Force¹⁷, la sal forma electrolitos fuertes y son transportados por los vientos marinos que conducen de 10 a 100 libras de sal marina por milla cubica de aire, los cuales finalmente se depositan en las partes expuestas, generando focos de corrosión altamente agresivos.

Con el objetivo de proteger las estructuras fundamentales en el funcionamiento de una aeronave, la US Air Force¹⁸ ha determinado que estas se deben proteger con sistemas de recubrimientos para superficies metálicos, dado que estas estructuras al tener la superficie expuesta reaccionan con el oxígeno y diversos contaminantes en la atmosfera, en este caso la sal, que en presencia de humedad forma oxido y productos de corrosión.

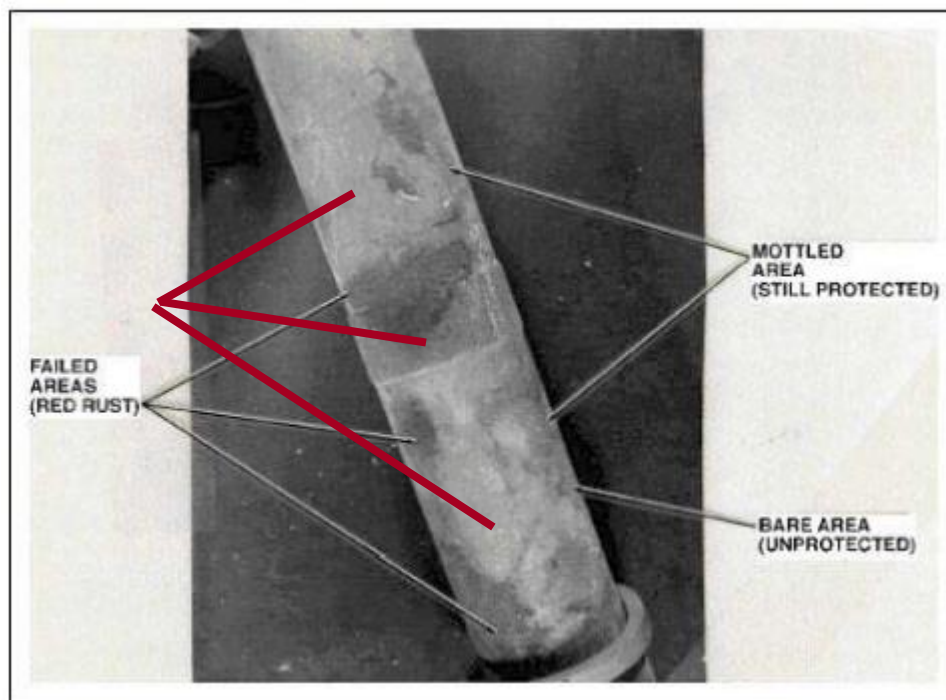
Componentes como el tren de aterrizaje son protegidos con recubrimiento base Cadmio, el cual es utilizado para preservar el acero, sin embargo, la US Air Force¹⁹ identificó que es susceptible a la corrosión uniforme en la superficie y se evidencia cuando aparece un depósito de polvo de color blanco o marrón en la superficie, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ven señaladas con líneas rojas.

¹⁷ US AIR FORCE. Ibid., p 41

¹⁸ US AIR FORCE. Technical Manual: Application and removal of organic coatings, aerospace and non-aerospace equipment. US: US Air Force: 2010, p 19. TO 1-1-8.

¹⁹ US AIR FORCE. Op. Cit., p 39.

Figura 2 Condiciones de superficie recubierta con Cadmio



Fuente: US Air Force, TO 1-1-691.

Es así como la constante revisión de los procedimientos en las áreas de ingeniería de la Fuerza Aérea Colombiana²⁰, generó la emisión del Mensaje Técnico 914, el cual hace parte del programa de prevención y control de corrosión en las aeronaves FAC. En este mensaje técnico se realiza un estudio de la corrosión atmosférica en componentes de aluminio 2024T3, aluminio 705T6, acero 4130 y acero 310; en el caso del A37B el tren de aterrizaje es de acero 4130, para el cual se determinaron los niveles de corrosividad y las frecuencias de las tareas de mantenimiento preventivo, como se relaciona a continuación:

UNIDAD	Niveles de corrosividad	Frecuencias de lavado (días)	Frecuencia Inspección Recubrimientos (meses)	Frecuencia Aplicación Inhibidores de Corrosión (días)
CACOM 3	Muy alta	7	4	45

²⁰ FUERZA AÉREA COLOMBIANA. Mensaje técnico: Mejoramiento al programa de prevención y control corrosión en aeronaves FAC. Bogotá: Fuerza Aérea Colombiana, 2018. MT 914 Rev 5.

Fuente: Fuerza Aérea Colombiana, Mensaje técnico 914.

Como se aprecia en la Tabla, las tareas de mantenimiento obedecen a un ambiente corrosivo severo y las frecuencias corresponden a un nivel muy alto de corrosividad para el CACOM 3.

También se realizan recomendaciones como inspección visual después de cada lavado para identificar la presencia de cualquier tipo de corrosión, así como el lavado entre periodos no mayores a los 15 días para estas aeronaves que se encuentran operando o estacionadas cerca de la zona costera.

De este modo, la Fuerza Aérea Colombiana aplica el recubrimiento base Cadmio electrodepositado de acuerdo con la norma AMS-QQ-P-416B de SAE Aerospace²¹ que dispone los tipos de recubrimiento de acuerdo con el espesor del componente mecánico, los protocolos y procedimientos para aplicarlo y las indicaciones para la inspección de calidad de las diferentes variables. La norma hace una aclaración respecto a la seguridad, ya a que el uso de cadmio ha sido restringido y prohibido para uso en muchos países debido a preocupaciones ambientales y de salud. Así mismo, dada su toxicidad no debe emplearse como revestimiento para cualquier objeto destinado para uso como contenedor de alimentos, utensilios de cocina o para cualquier objeto que pueda entrar en contacto con alimentos.

2.1.1 Recubrimiento del Cadmio

El Cadmio es un material anódico que actúa como ánodo de sacrificio en la corrosión, en este caso es para proteger el acero 4130 con el cual están fabricados los trenes de aterrizaje de las aeronaves. A pesar de las propiedades de los recubrimientos de cadmio electrolítico, como la alta resistencia a la corrosión, su lubricidad intrínseca, su ductilidad y su conductividad eléctrica lo hacen un excelente método de protección²², no se debe desconocer su alta toxicidad y la afectación que genera en la salud, seguridad y medioambiente, por lo que se ha limitado el uso del metal por parte de organismos internacionales mediante normatividad como la REACH (Registro, evaluación, autorización y la restricción de sustancias y preparados químicos), de la Unión Europea²³ a través del reglamento (UE) N°1 1907/2006, que hace especial énfasis en las restricciones de uso como se menciona en el anexo XVII sobre las restricciones a la fabricación, la comercialización y el uso de determinadas sustancias, mezclas y artículos peligrosos, en el ítem 23 Cadmio, No. 5 y 6 menciona la prohibición del cadmiado en la fabricación de ciertos artículos; en el No.7 hace referencia a la industria

²¹ SAE AEROSPACE. Aerospace material specification: Plating, Cadmium (Electrodeposited). US: SAE Aerospace, 2004, p 15. AMS-QQ-P-416B.

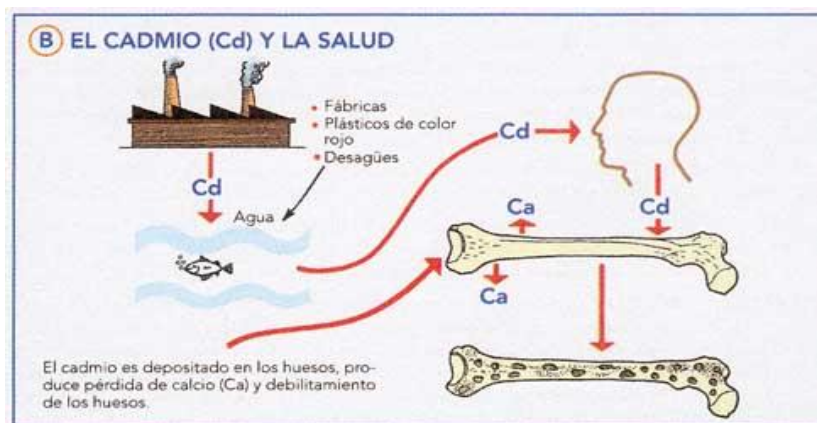
²² TORRES GONZÁLEZ, Julieta. Recubrimientos alternativos para el cadmio. En: La Crónica Diaria. {En línea}. {06-08-2016}. Disponible en: <https://cutt.ly/nuz5RU6>

²³ UNIÓN EUROPEA, Consejo. REACH (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Reino Unido: Consejo Unión Europea, No. 1, 2006, 1907/2006.

aeronáutica señalando que “no se aplicaran las restricciones a los artículos y componentes de artículos utilizados en el sector aeronáutico y aeroespacial...”; así mismo la USEPA (US Environmental Protection Agency)²⁴ se ha pronunciado al respecto, lo que ha llevado a buscar tecnologías alternativas de sustitución, como baños de sales fundidas, procesos con vapor deposición de aluminio, baños orgánicos, depósitos en solución acuosa u otros recubrimientos con metales con menos grado de toxicidad.

Respecto a la toxicidad el cadmio es un metal pesado, con propiedades parecidas a las del zinc, en la agricultura forma parte de fertilizantes fosforados y de pesticidas. Es considerado uno de los venenos públicos por su impacto en el ambiente y los daños que puede ocasionar a la salud de las personas. De acuerdo con el informe de Perú Ecológico²⁵ en su sitio web, el cadmio y sus compuestos son vertidos a las aguas a través de los relaves mineros y desagües de las industrias, depositándose en el barro de los ríos y lagos. Llega a los alimentos a través de las aguas de irrigación. El cadmio, absorbido con los alimentos, produce descalcificación de los huesos, volviéndolos quebradizos (Figura 3), y en dosis mayores produce la muerte.

Figura 3. El Cadmio y la salud



Fuente: <https://www.peruecologico.com.pe>

El uso de este metal tiene grandes consecuencias en la salud del ser humano, ya que la exposición directa al cadmio genera una degeneración del sistema óseo y según Thao T. Ha²⁶ está vinculado a la patogenia de la osteoporosis, además que,

²⁴ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Risk and Technology Review for National Emission Standards for Aerospace Manufacturing and Rework Facilities. US: Environmental Protection Agency, 2017. EPA-HQ-OAR-2014-0830.

²⁵ PERÚ ECOLÓGICO. El Cadmio y la Salud. 2012. {En línea}. {07-03-2020}. Disponible en: http://www.peruecologico.com.pe/lib_c23_t07.htm.

²⁶ THAO T. HA, *et al.* Heggland. Pleiotropic roles of Ca²⁺/calmodulin-dependent pathways in regulating cadmium-induced toxicity in human osteoblast-like cell lines. En: Toxicology Letters. Suiza: Eurotox, 2016, Vol 260, pp. 18-27.

de acuerdo con lo expuesto por Mosser²⁷ en la actualidad muchos residuos electrónicos contienen este metal pesado. El cadmio es excesivamente tóxico y cancerígeno, y como lo evidencia Whitaker²⁸, en la Aerospace Environmental Technology Conference, la exposición continua a este material es perjudicial para la salud, generando una acumulación en el hígado y los riñones.

El cadmio es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica para la protección contra la corrosión de componentes de las aeronaves, como elementos de fijación que son fabricados en aceros de alta resistencia y resisten la corrosión, sin embargo, los intereses ambientales y de seguridad sobre la alta toxicidad del cadmio han llevado a realizar estudios para identificar reemplazos adecuados, los cuales deberían ofrecer una protección efectiva contra la corrosión y no tener efectos perjudiciales para el sustrato de acero.

Páez²⁹ afirma que anualmente la producción mundial de cadmio supera las 17.000 toneladas, es utilizado en el galvanizado de diferentes objetos metálicos fabricados especialmente en acero, hierro, cobre y otras aleaciones con el fin de prevenir la corrosión. También es usado en la producción de pigmentos a base de ciertos compuestos de cadmio (sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio), que se emplean en una amplia variedad de productos como el plástico, vidrio, hule, cerámica y textiles. Con esto, se demuestra su presencia en gran cantidad de elementos que son utilizados comúnmente, y que finalmente van a parar a las fuentes hídricas siendo un factor importante en la contaminación.

Laws³⁰, muestra el alto uso de metales como el cadmio. A continuación (Tabla 1), se relacionan las áreas donde son más utilizados los metales pesados como Cadmio, Mercurio y Plomo, en el caso de Estados Unidos.

Tabla 1. Principales usos del cadmio, mercurio y plomo

Tabla 4. Principales usos del cadmio, mercurio y plomo.	
Cadmio	
Galvanizado (45%)	Aleaciones (7,5%)
Pigmentos (21%)	Baterías (3%)
Estabilizadores plásticos (15,1%)	Otros (8,4%)
Mercurio	
Aparatos electrónicos (42,2%)	Preparaciones dentales (3,1%)

²⁷ MOSSER, Mark F. Metallic – Ceramic Coatings as Replacements for Cadmium Plating. En: SAE Technical paper 900968. Airframe finishing, Maintenance and Repair Conference and Exposition. US: SAE, 1990. DOI: <https://doi.org/10.4271/900968>.

²⁸ WHITAKER, A.F. Aerospace Environmental Technology Conference. US: NASA, 1995, No. 3298. {En línea}. Disponible en: <https://cutt.ly/nuxwRim>

²⁹ PÁEZ OSUNA, Federico. Fuentes de metales en la zona costera marina. En: BOTELLO, Alfonso, *et al.* Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental. México: Institución Nacional de Ecología, 2005, pp. 329-343.

³⁰ LAWS, Edward A. Aquatic pollution: An Introductory text. 4ta Edición. New York: Editor John Wiley & Sons Inc, 2017, p 338.

Producción de cloro y sosa (24,7%)	Catalizadores (2%)
Pinturas (12,1%)	Otros (7,9%)
Dispositivos de medición (7,8%)	
Plomo	
Productos metálicos (12,3%)	Pigmentos (7,1%)
Soldadura (4,2%)	Gas antidetonante (16,1%)
Baterías (56,3%)	Otros (4%)
() Porcentaje relativo a su uso en Estados Unidos hace 25 años (Laws, 1981)	

Fuente: Golfo de México: contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias.

No obstante, Laws³¹ asevera que para el año 2016, a través de las regulaciones de la EPA, el uso del mercurio en Estados Unidos había sido eliminado, con excepción de las amalgamas dentales y en el año 2008, la Unión Europea emitió una directiva que restringió al máximo el uso del cadmio; la directiva tuvo una modificación en el año 2013, donde específicamente se prohibió el uso del cadmio en la mayoría de las baterías de níquel-cadmio, ya que estas representan más del 80 % del uso de este metal a nivel mundial. Así mismo, Smith³² menciona que las regulaciones europeas no permiten el uso de cadmio para usos generales en ingeniería, y grandes potencias mundiales como Estados Unidos y Japón tienen restricciones para su uso.

Pese a los riesgos para la salud y el medio ambiente que representa el uso del cadmio en los diferentes procesos de ingeniería, este se sigue utilizando, pues los recubrimientos de base cadmio ofrecen propiedades muy favorables respecto a la protección contra la corrosión, dado que proporcionan una protección a largo plazo, especialmente para los ambientes salinos a los cuales están expuestos las aeronaves militares. También Smith³³ dice que el rendimiento de este recubrimiento puede mejorarse mediante tratamientos de pasivación de cromato sobre la capa electrodepositada de cadmio, a partir de este mejoramiento con cromo se puede plantear una opción para la sustitución del cadmio, ya que presenta un excelente comportamiento de resistencia a la corrosión.

2.1.2 El cadmio y posibles sustitutos

El cadmio actúa como un recubrimiento de sacrificio por lo que, si en algún momento el recubrimiento presenta una falla, agrietamiento o similar, el cadmio se corroerá primero que el acero por su potencial de circuito abierto más negativo respecto al acero. Sin embargo, como menciona Smith³⁴ y Wallance³⁵, el cadmio

³¹ LAWS, Edward A. Ibid., p. 339

³² BALDWIN, K. R. & SMITH, C. J. E. Advances in Replacements for Cadmium Plating in Aerospace Applications, En: Transactions of the IMF. The International Journal of Surface Engineering and Coatings. UK: Tailor & Francis online, 1996, Volumen 74, No. 6, pp. 202-209.

³³ SMITH, Ibid., pp. 202-209.

³⁴ SMITH, C.J.E. 'Current requirements for the design and maintenance against corrosion of UK military aircraft'. En: Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD). Lecture Series. Toronto: North Atlantic Treaty Organization, 1985, No.141, pp. 6-13.

no produce una alta cantidad de productos de corrosión, como si lo hace el zinc, por lo que en componentes como sujetadores no es tan efectivo, pues no acumula el material en la capa protectora de cadmio, pero por el otro lado presenta mayor adherencia y es un elemento auto lubricante que presenta un bajo coeficiente de fricción, lo que lo convierte en buena opción para los recubrimientos de componentes roscados. Las piezas recubiertas con cadmio, afirma la US Air Force³⁶, desarrollan propiedades en la superficie como resistencia a la abrasión y resistencia a la oxidación a altas temperaturas además de ser compatibles con los materiales utilizados en la industria aeronáutica. Cuando el cadmio es atacado por la corrosión, crea una capa de polvo blanco y aun presentando grietas en el recubrimiento cumple la función protectora hasta que llega a la placa del sustrato.

En el campo aeronáutico, García³⁷ afirma que los recubrimientos de cadmio han demostrado ser los más efectivos para prevenir la corrosión, cuando se aplican sobre pasadores roscados, tornillos, conectores y algunos componentes de trenes de aterrizaje. Al ser el campo aeronáutico una de las industrias en las que se debe ser más exigente y evitar cualquier tipo de factor que afecte la seguridad de las aeronaves, se ha encontrado que el cadmio es el material más eficaz en mitigar la corrosión, aunque no la detiene completamente.

Se han realizado estudios, que han buscado alternativas al Cadmio para la protección de sacrificio contra la corrosión de los componentes de acero en las diferentes maquinas, por eso se han tenido en cuenta diferentes criterios para seleccionar un recubrimiento adecuado que brinde todas las ventajas del Cadmio, como ser un elemento de sacrificio que proteja el sustrato y que no sea tan electronegativo, ya que elevaría la velocidad de corrosión innecesariamente.

En ese sentido, Mahmud³⁸ propone que los recubrimientos electroquímicos de zinc-níquel por su características y propiedades como buena soldabilidad, dureza y resistencia a la corrosión puede ser un reemplazo para los recubrimientos de cadmio. Por su lado, Smith³⁹ ha analizado recubrimientos para la industria aeronáutica como zinc y sus aleaciones, aluminio y sus aleaciones y otros recubrimientos metálicos, sin embargo, con el zinc genera bastantes productos de corrosión lo que ocasiona que los elementos recubiertos se atasquen, además, por ser un elemento más electronegativo, rápidamente dejaría desprotegido el

³⁵ WALLANCE, W. HOEPFNER, D.W. & KANDACHAR, P.V. AGARD AG 278 Volumen 1. Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories. Toronto: North Atlantic Treaty Organization, 1985, p. 208.

³⁶ US AIR FORCE. Op. Cit., p. 40.

³⁷ GARCÍA MARTÍNEZ. Op. Cit., p 8.

³⁸ MAHMUD, Z. *et al.* Caracterización estructural de recubrimientos de aleación de Zn-Ni con partículas de CSI o de Al₂O₃ obtenidos por electrodeposición. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2016, p. 2.

³⁹ BALDWIN, K. R. & SMITH, C. J. E. Op. Cit., pp. 202-209.

sustrato. También Nelson, M.J. y Groshart, E.C.⁴⁰ han considerado otros metales como el níquel y el cobalto como adiciones a las aleaciones de zinc, que han sido ampliamente utilizadas en la industria automotriz y en la industria aeroespacial. Boeing ha estudiado la posibilidad de aplicar recubrimientos de aleación Zn-Ni con 10 % de Ni y Sn-Zn con 20 % de Zn como sustitutos del Cadmio. Para Hillier, E.M.K. y Robinson, M.J.⁴¹ estos recubrimientos de Zn-Ni con un 14 % de Ni, en diferentes pruebas de niebla salina han presentado propiedades de alta resistencia a la corrosión, y también son compatibles con las aleaciones utilizadas en la fabricación de aeronaves como lo es el cadmio. Dev Chidambaram⁴² ha evaluado el comportamiento electroquímico de diferentes recubrimientos de WC-Co-Cr, WC-Ni-Cr, Cr-Mo-Si-Ni y Ni-Cr-C-B presentes en la aleación AISI-316 y de acuerdo con los resultados, se evidenció que los recubrimientos con alto contenido de Cr y Ni tienen mayor resistencia a la corrosión en comparación con la aleación sin recubrir.

A nivel internacional, plantea Brooman⁴³, que se han sugerido diferentes materiales para la sustitución del cadmio, pero difícilmente un solo material reúne las características. Dentro de los propuestos se incluye aleación de Zn-Ni, Sn-Zn, Sn-Ni entre otros. Para García⁴⁴ otro excelente candidato como alternativa al cadmio, es el aluminio que ha tenido buena aceptabilidad dentro de la industria, en particular se ha empezado a utilizar en el sector aeronáutico en pequeñas aplicaciones, pero sin eliminar el uso del cadmio en algunos componentes, incluso el Department of Defense, EU⁴⁵ ha utilizado el aluminio en aplicaciones militares para armamento de acuerdo con lo contemplado en la norma militar MIL-DTL-83488-D. No obstante, se debe tener en cuenta, describe Torabinejad⁴⁶, que el contenido del elemento activo en la capa superior del revestimiento es más bajo

⁴⁰ NELSON, M.J. & GROSHART, E.C. Cadmium plating replacements. En: Aerospace Environmental Technical Conference. Huntsville, Alabama: Aerospace Environmental Technical Conference, 1994, pp. 277–284.

⁴¹ HILLIER, E.M.K. & ROBINSON, M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc–cobalt alloys. En: Corrosion Science. UK: Elsevier Ltd. 2004, Volume 46, pp. 715-727. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00180-X).

⁴² DEV CHIDAMBARAM, CLAYTON, Clive R. & DORFMAN, Mitchell R. Evaluation of the electrochemical behavior of HVOF-sprayed alloy coatings. En: Surface and Coatings Technology. Netherlands: Elsevier Ltd. 2004, Volume 176, pp. 307-317. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00809-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00809-0).

⁴³ BROOMAN, E.W. Corrosion performance of environmentally acceptable alternatives to cadmium and chromium coatings: Chromium—Part II. En: Metal Finishing. US: Elsevier USA. 2000, Volume 98, Issue 8, pp. 39-45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(00\)82740-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(00)82740-3).

⁴⁴ GARCÍA MARTÍNEZ, María. Desarrollo de recubrimientos base aluminio mediante MOCVD para protección frente a la corrosión y a la oxidación. Madrid. 2013. p. 129. Trabajo de investigación (Doctorado en Materiales). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.

⁴⁵ DEPARTMENT OF DEFENSE, EU. MIL-DTL-83488D Detail specification coating, aluminium high purity. EU: Department of Defense. 1999. MIL-DTL-83488D.

⁴⁶ TORABINEJAD, V., *et al.* Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings A Review. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2017, Volumen 691, pp. 841-859.

que el de las capas inferiores, lo que conduce a una mejor resistencia a la corrosión. En el caso de una aleación Ni-Fe, el potencial de corrosión es inversamente proporcional al contenido de hierro.

Cardilli⁴⁷ ha propuesto ampliamente el Aluminio por su baja o casi nula toxicidad, bajos efectos en el medio ambiente y ningún efecto perjudicial sobre el sustrato de acero. El recubrimiento de aluminio es favorable para la eliminación de la fragilización por hidrogeno, pero aun así es susceptible a la pasivación en un ambiente corrosivo suave. También Wen⁴⁸ analizó considerablemente la resistencia a la corrosión del Ni en diferentes escenarios, como en compuestos intermetálicos de Ni-Al con una relación molar 1:1 y se determinó mediante la prueba de impedancia electroquímica en un medio de NaCl al 3,5 %, que cuanto más amplio es el rango de frecuencias en el que el ángulo de fase sigue siendo el más alto, la película de óxido de la muestra es más estable comenzando a pasivarse, aunque muestra en la prueba de curvas de polarización potenciodinámica que por el alto contenido de Al pueden producirse picaduras. El Ni comúnmente es depositado por electrodeposición para inhibir la corrosión, afirma Hefnawy⁴⁹, no obstante, se han adicionado otras partículas como TiN y Co para mejorar su comportamiento anticorrosivo y modificar sus propiedades, como el aumento de la dureza y disminución del tamaño del grano.

Por su parte Qin-Yin Wang⁵⁰ también evaluó un recubrimiento de Ni-Cr-Mo en soluciones con H₂S y CO₂. Se pensaba que se causaría corrosión por picadura, sin embargo, estos procesos de corrosión estaban controlados por la alta concentración de Cr y Mo, que generan unas densas películas de óxido que evitan que los iones nocivos penetren hacia el material y mejoran la resistencia a la corrosión. En otro estudio, J.J.Si⁵¹ evidenció en una prueba con cristales metálicos de Cr₄₉Co₃₉NbB₁₄ y Cr₅₀Co₂₉Nb₇B₁₄ en soluciones de HCl, que las aleaciones pueden ser pasivas contra la corrosión y la presencia de Cromo permite una alta resistencia a la corrosión, dado que se forma una película de óxido de cromo que

⁴⁷ CARDILLI, Emanuele. Aluminium-based Coatings for Cadmium Replacement. Cranfield. 2008. p. 17. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencias Aplicadas). Cranfield University, School of Applied Sciences.

⁴⁸ JING WEN, *et al.* Effect of pase composition and microstructure on the corrosión resistance of Ni-Al intermetallic compounds. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2017, Vol: 695, pp. 2424-2433.

⁴⁹ HEFNAWY, A., ELKHOSHKHANY, N. & ESSAM, A. Ni – TiN and Ni-Co-TiN composite coatings for corrosión protection: Fabrication and electrochemical characterization. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2018, Volumen: 735, pp. 600-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.169>

⁵⁰ QIN-YIN WANG, *et al.* A study on corrosión behaviors of Ni-Cr-Mo laser coating, 316 stainless Steel and X70 steel in simulated solutions with H₂S and CO₂. En: Surface and Coatings Technology. Netherlands: Elsevier. 2016, Vol 291, pp. 250-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.017>

⁵¹ SI, J.J., *et al.* Corrosion behavior of Cr-based bulk metallic glasses in hydrochloric acid solutions. En: Corrosion Science. UK: Elsevier Ltd. 2016, Vol 107, pp. 123-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.026>

presenta ventajas sobre las propiedades de pasivación. Julve⁵² afirma así mismo que, efectivamente la delgada película de óxido que se forma al ser expuesto al aire o en el proceso de cromado, previene el ataque del medio ambiente, pero para que sea altamente efectivo este recubrimiento debe tener una capa con espesor bastante considerable, según Jiménez⁵³ alrededor de 0,1mm. También se reportó a partir de la técnica de Difracción de Rayos X, un mejor comportamiento en la resistencia a la oxidación en $\text{Cr}_x\text{Al}_x\text{N}$ para $x=0,7$ que en películas de $\text{Ti}_x\text{Al}_x\text{N}$, lo que puede estar asociado a la presencia de óxido de aluminio.

El recubrimiento de cromo junto con el níquel, según Julve⁵⁴ van unidos en muchas aplicaciones en la industria galvanotécnica y es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica por su gran resistencia al calor y desgaste, se destacan sus aplicaciones en equipos militares, con una buena proporción de óxido de cromo lo que explica su excelente resistencia a la corrosión, el cual es obtenido a partir de electrolitos que contiene un 75 % de cromo y un 25 % de óxidos de cromo, sin embargo, es vulnerable al ataque de ácidos minerales y de soluciones reductoras, aunque es capaz de resistir el ataque de ácido nítrico concentrado.

Zhang⁵⁵ afirma que los recubrimientos con alto porcentaje de cromo se consideran materiales de recubrimiento duros, prometedores para beneficiar a un número de aplicaciones industriales debido a su alta dureza, buena resistencia al desgaste y a la corrosión, además de resistencia a la oxidación a alta temperatura.

Por su parte el níquel, también ha sido utilizado ampliamente como recubrimientos protectores contra la oxidación y la corrosión. Henao⁵⁶ ha evaluado recubrimientos de níquel depositados sobre sustratos de acero y carbono AISI 1016 mediante polarización lineal en un electrodo de disco rotatorio a diferentes velocidades de rotación y evidenció que la morfología de los recubrimientos es regular y compuesta principalmente por cristales en forma de poliedros, han presentado un mejor comportamiento frente a la corrosión-erosión y mayor micro dureza, esto se debe a que, con el aumento de la velocidad de rotación, los cristales de níquel se

⁵² JULVE SALVADO, Enrique. Perspectiva general del cromado industrial: características físicas del recubrimiento y tipos de cromado. En: Anales de la Real Sociedad Española de Química. España: Real Sociedad Española de Química. 2001, No. 3, pp. 19-27.

⁵³ JIMÉNEZ COBOS, Luis German. Recubrimientos metálicos de cobre, cromo y níquel en piezas ferrosas mediante el proceso electrolítico. Quito, Ecuador. 2017. p. 30. Trabajo de investigación (Tecnólogo Superior en Electromecánica). Universidad Central del Ecuador. Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación.

⁵⁴ JULVE SALVADO. Op. Cit., p. 6.

⁵⁵ ZHANG, Z.G., *et al.* Influence of Ni content on the structure and properties of Cr–Ni–N coatings prepared by direct current magnetron sputtering. En: Thin Solid Films. Switzerland: Elsevier. 2009, Volume 517, Issue 11, pp. 3304-3309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.014>.

⁵⁶ HENAO, Johnny; GÓMEZ, Maryory y CALDERÓN, Jorge. Evaluación de las Propiedades de Recubrimientos de Níquel Electrodepositados. En: Revista Colombiana de Materiales. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2011, Número 1, p. 2.

hicieron más pequeños lo que hace que exista una mejor compactación del recubrimiento.

Así mismo, el cromo, en forma de recubrimiento, es un material ampliamente utilizado en la protección de piezas de uso industrial y en la recuperación de piezas desgastadas, lo que ha demostrado su durabilidad, este material presenta buena resistencia a la corrosión en ambiente salino, no obstante, el recubrimiento con cromo genera imperfecciones en la capa, lo cual puede ser mitigado por el níquel, ya que los recubrimientos con níquel presentan una superficie lisa.

Se espera que la combinación de estos dos tipos de materiales pueda conducir al desarrollo de recubrimientos con nuevas propiedades del material, que extenderían sus aplicaciones en la industria. Martínez⁵⁷ afirma que la presencia de cromo y níquel en los recubrimientos ha mejorado las propiedades mecánicas de los materiales, pues por su dureza presentan resistencia al desgaste.

De lo anterior podría considerarse que los recubrimientos de níquel y cromo pueden ser evaluados como potenciales candidatos para sustitución del cadmio, puesto que cumplen los criterios básicos para una protección contra la corrosión de los componentes de acero en aplicaciones aeronáuticas.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Aeronave militar

Una aeronave militar para Ferreira⁵⁸ es diseñada fundamentalmente para el combate aéreo con otras aeronaves, son utilizadas en las líneas frontales del campo de batalla (superioridad aérea, ataque e inteligencia) en oposición a los bombarderos, que están diseñados principalmente para atacar objetivos terrestres mediante el lanzamiento de bombas. A estas aeronaves tal como lo expresa Aguilera⁵⁹, se les exige un rendimiento que es técnicamente superior al de sus oponentes reales o potenciales. Las aeronaves tipo Caza (Figura 4) son pequeños, veloces y de gran maniobrabilidad. Muchos Cazas poseen capacidades

⁵⁷ MARTÍNEZ, Dora; PÉREZ, Alberto y VELASCO, Abraham. Desgaste en recubrimientos duros en el transporte neumático de hierro de reducción directa. En: Ciencia UANL. México: Universidad Autónoma de Nuevo León. 2004, Volumen 7, Número 2, p. 178.

⁵⁸ FERREIRA, Marcos José Barbieri. Dinamica da inovação e mudanças estruturais: um estudo de caso da industria aeronautica mundial e a inserção brasileira. Brasília. 2009. 257 p. Trabalho de investigação (Doctorado Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas). Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia.

⁵⁹ AGUILERA, Ana Carolina, *et al.* Mapeamento Da Base Industrial De Defesa. Brasília: Agencia Brasileira de Desenvolvimento Industrial ABDI, Instituto de Pesquisa Economica Aplicada IPEA. 2016, p. 400. ISBN: 978-85-6132-341-7.

secundarias de ataque a tierra, y algunos son de doble propósito para actuar como cazabombarderos; término también usado para nombrar a los aviones de ataque a tierra. Las aeronaves de combate son el principal medio con el que las fuerzas armadas consiguen la superioridad aérea sobre sus oponentes en batalla.

Figura 4. Aeronave A-37B Fuerza Aérea Colombiana



Fuente: (Fuerza Aérea, 2019), <https://www.fac.mil.co>

2.2.2. Tren de aterrizaje

Se denomina tren de aterrizaje (Figura5) al conjunto de ruedas, soportes, amortiguadores y otros equipos que un avión utiliza para aterrizar o maniobrar sobre una superficie. El tren de aterrizaje le permite realizar las operaciones de rotación en tierra (desplazamientos, giros, remolque, aceleraciones y deceleraciones en el despegue y aterrizaje respectivamente)⁶⁰ además sirve como soporte al aeroplano y amortigua el impacto del aterrizaje, que permite absorber toda la energía cinética de la aeronave cuando entra en contacto con el suelo. Las operaciones en superficie exigen del tren de aterrizaje capacidades de direccionamiento y frenado, y para amortiguar el aterrizaje debe ser capaz de absorber impactos de cierta magnitud.

Figura5. Tren de aterrizaje aeronave A-37B



⁶⁰ TRALLERO, Rafael; ATIENZA, Juan. El tren de aterrizaje en las aeronaves. E. Vol XI, p. 4. ISSN: 1696-8085.

ción histórica de los trenes de aterrizaje. Universidad César Vallejo. 2013,

Fuente: (Gómez, 2017).

2.2.3. Corrosión

Los metales son materiales utilizados en casi todas las actividades que realizamos en la vida cotidiana, pero según el Fondo de Cultura Económica⁶¹, estos se degradan con el tiempo de diferentes formas, lo que afecta sus propiedades y por consiguiente su funcionalidad. Los metales, en especial, con la interacción con diferentes medios presentan una reacción química que degrada o modifica sus propiedades. Dichas reacciones son el proceso de corrosión, que obedece a leyes químicas bien establecidas, por lo que los metales tratan de regresar a su forma natural con el pasar del tiempo, es decir tienden al estado de existencia más estable o al estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfato o carbonato.

Concretamente Elayaperumal & Raja⁶² afirman que, la corrosión es un proceso de oxidación química o electroquímica, en el que el metal transfiere electrones al medio ambiente y sufre un cambio de valencia de cero a un valor positivo. El medio ambiente puede ser líquido, gaseoso o líquido híbrido. Estos entornos se llaman electrolitos, ya que tienen su propia conductividad para la transferencia de electrones. Por lo anterior, el Fondo de Cultura Económica⁶³, dice que la corrosión debe ser regida por las leyes establecidas por la física y la química, estableciendo que un metal solo puede corroerse al pasar a un estado más oxidado, cuando sea inestable con respecto a los productos formados por su corrosión; dicha inestabilidad puede expresarse en términos energéticos, según Díaz⁶⁴, la energía

⁶¹ FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. Mas allá de la Herrumbe. Segunda reimpresión. Ciudad de México. Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA). 1996.

⁶² ELAYAPERUMAL, K. & RAJA, V. S. Forms of Corrosion. En: Corrosion Failures: Theory, Case Studies, and Solutions. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2015. DOI:10.1002/9781119043270.

⁶³ FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. Op. Cit., p 21.

⁶⁴ DIAZ, I., *et al.* Some Clarifications Regarding Literature on Atmospheric Corrosion of Weathering Steels. En: International Journal of Corrosion and Scael Inhibition. Russian Federation: Russian Association of Corrosion Engineers. 2012, Volumen 2012, pp. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/812192>.

libre o potencial termodinámica del sistema disminuye de tal forma que habrá equilibrio cuando sea mínima su energía libre G .

$$\Delta G < 0$$

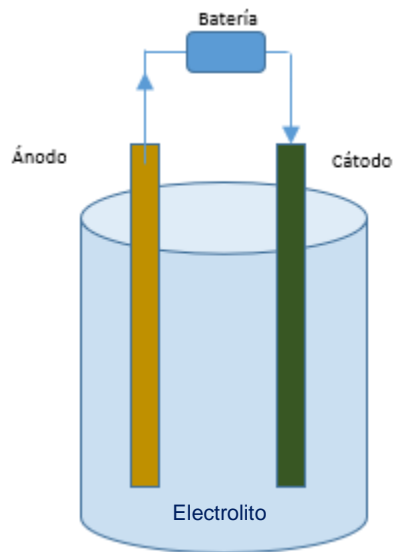
El cambio en la energía libre refleja la tendencia a producirse la reacción y su dirección. Se pueden presentar tres casos:

- a. La energía libre es positiva: el metal es activo y puede presentar corrosión.
- b. La energía libre es positiva: el metal está pasivo o pasivado, es decir el metal permanece sin ser atacado aparentemente.
- c. La energía libre es cero o negativa: son los metales nobles, el metal es indiferente a los agentes agresivos externos y no se da ninguna reacción de corrosión.

Por lo tanto, el deterioro que sufre un material es consecuencia de un ataque químico por su entorno, la corrosión tiene lugar debido a la solución o a otra reacción de la superficie de un componente con su medio ambiente. En el caso de los metales, Flinn & Trojan⁶⁵ afirman que cada caso de corrosión se puede estudiar como una celda electroquímica en la cual, dos metales diferentes se sumergen en una misma solución conductora, llamada electrolito, y son conectados eléctricamente entre sí, permitiendo el flujo de electrones del metal más activo o anódico hacia el metal más noble o catódico. Es imprescindible la presencia de una zona anódica, una zona catódica y un electrolito para que se dé el proceso de corrosión (Figura6).

Figura6. Celda Electrolítica

⁶⁵ FLINN, Richard A. & TROJAN, Púl K. Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1993.



El proceso de corrosión descrito anteriormente tiene diferentes efectos considerables dentro de los procesos industriales como la seguridad, un factor importante, pues los equipos o maquinaria que fallan por corrosión puede ocasionar pérdida de vidas humanas; otro factor importante, es la limitación de los recursos, especialmente, las fuentes de los metales, la constante demanda de maquinaria lleva a la sobre explotación de los recursos para mantener esa demanda del mundo industrial, y finalmente el factor económico, ya que a las empresas les representa un costo muy alto realizar programas de prevención de corrosión y reparación de equipos por daños debidos a corrosión. Por lo anterior, las empresas están en un constante proceso de mejoramiento para prolongar el tiempo de servicio de un equipo, disminuir su mantenimiento y trabajar en diseños de elementos más eficientes frente a los procesos de degradación. En consecuencia, la corrosión es un proceso destructivo en cuanto a lo que se refiere a la ingeniería y representa una enorme pérdida económica, de ahí que la industria centra su atención en el control y prevención de la corrosión.

2.2.3.1. Tipos de corrosión

Conforme a Volkan Cicek⁶⁶, los tipos de corrosión se pueden clasificar en dos categorías:

- Corrosión generalizada: Ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándola completamente. La velocidad

⁶⁶ CICEK, Volcan. Types of corrosion. En: *Corrosion Engineering*. US: John Wiley & Sons. 2014. p. 43-81

de corrosión para estos casos es influenciada por la diferencia de energía potencial al coexistir impurezas y fases distintas en el material, formando electrodos a pequeña escala, acorde con Salazar-Jiménez, J⁶⁷

- Corrosión atmosférica: dado a que los polvos y precipitados solidos que se presentan sobre la superficie del metal son higroscópicos atraen la humedad del aire contribuyendo a un ambiente ácido y por ende aumentando la corrosión Volkan Cicek⁶⁸
- Corrosión en el agua: se clasifican comúnmente como agua de mar y agua dulce, como ríos, lagos y aguas subterráneas. Por ejemplo, el agua de mar tiene una conductividad alta por su elevado contenido de sal, generando un aumento en la velocidad de corrosión, a diferencia del agua dulce que generalmente tiene conductividades ZHANG⁶⁹
- Corrosión por alta temperatura: es un tipo de corrosión seca, dado a que las moléculas del gas oxidante reaccionan con el material involucrado, donde, por efecto de la temperatura, el compuesto formado se difunde al interior del material, permitiendo que el proceso continúe, fragilizando el material Salazar-Jiménez, J⁷⁰

II. Corrosión localizada: Se manifiesta en zonas específicas del material lo que dificulta su detectabilidad. Dentro de esta categoría los tipos más representativos son:

- Corrosión galvánica: se genera por el contacto de un metal con otro material conductor en un medio corrosivo, formando una celda electroquímica, en la que, la velocidad de corrosión depende de la diferencia entre los potenciales del ánodo y el cátodo.
- Corrosión por picaduras: También llamada *pitting*, se presenta en materiales pasivados, debido a las características geométricas del sistema, existe una acumulación de agentes oxidantes y un incremento del pH del medio, lo que propicia el deterioro de la capa pasivada, permitiendo la adsorción de aniones agresivos, como

⁶⁷ SALAZAR-JIMÉNEZ, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). En: Tecnología en Marcha. Vol. 28, No. 3, Julio-Setiembre 2015, p. 127-136

⁶⁸ CICEK, Volcan. Op Cit., p 46.

⁶⁹ ZHANG, X.G. Galvanic Corrosion. En: Uhlig's corrosion handbook (3ª Edición). US: John Wiley & Sons, Inc. 2011. p. 126-143

⁷⁰ SALAZAR-JIMÉNEZ. Op Cit., p 130.

haluros y sulfatos generando que la corrosión se desarrolle en zonas puntuales. Salazar-Jiménez, J⁷¹

- Corrosión por cavitación: se produce en condiciones de dinámica de fluidos, provocando grandes variaciones de presión debido a las altas velocidades formando burbujas de aire, las cuales implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación, facilitando el desarrollo del proceso de corrosión, sostiene EFIRD⁷².
- Corrosión microbiológica: La naturaleza del líquido que se transporta en un sistema, propicia la acumulación y reproducción de bacterias, las cuales forman biopelículas que entrapan iones que generan potenciales electroquímicos localizados, según BRUCE-MACKAY⁷³
- Corrosión intergranular: es el ataque localizado con propagación hacia la estructura del material sin corrosión importante en otras partes de la superficie. La principal causa de este tipo de corrosión es la presencia de elementos galvánicos debido a diferencias en la concentración de impurezas o elementos de aleación, afirma EFIRD⁷⁴
- Corrosión – erosión: ocurre cuando hay un movimiento relativo entre un fluido corrosivo y un material metálico sumergido en él, produciendo una acción combinada de abrasión mecánica y desgaste en la superficie del metal, sugerido por CICEK⁷⁵
- Corrosión – tensión: Ocurre cuando en un material, sometido a esfuerzo de tensión, ya sea de forma interna o externa, se forman pequeñas fisuras, que dan inicio al proceso de corrosión, conforme a ZHANG, X.G.⁷⁶
- Corrosión – fatiga: Se genera por los esfuerzos externos cíclicos o fluctuantes en el sistema.
- Corrosión – Desaleación: es un proceso de corrosión que actúa sobre aleaciones metálicas, en donde uno de los elementos, de mayor afinidad con el oxígeno, se separa de la aleación y dejan una

⁷¹ SALAZAR-JIMÉNEZ. Ibit., p 132.

⁷² EFIRD, K.D. Controlling flow effects on corrosion. En: *Uhlig's corrosion handbook* (3ª Edición). US: John Wiley & Sons, Inc. 2011. p. 903-905.

⁷³ BRUCE-MACKAY. Nausha Askar. La corrosión: la lucha más extensa. En: *Oifield Review*, 2016, Vol. 28, No. 2, p. 36-51

⁷⁴ EFIRD, K.D. Op Cit., p 904.

⁷⁵ CICEK, Volcan. Corrosion Prevention and Protection. En: *Corrosion Engineering*. US: John Wiley & Sons. 2014. p. 101-168

⁷⁶ ZHANG, X.G. Op Cit., p 129.

estructura porosa de pobres propiedades conformada por el resto de constituyentes, afirmado por ZHANG, X.G.⁷⁷

- Filiforme: es un fenómeno de la superficie y no afecta la resistencia del metal, se produce en ambientes de alta humedad sobre materiales con recubrimientos de pintura o caucho, los cuales, al ser rayados, se induce el desarrollo de la corrosión, que inicia en un punto débil del recubrimiento, donde pueden ingresar oxígeno y agua, asevera Volkan Cicek⁷⁸.

2.2.3.2. Factores que intervienen en la corrosión.

El proceso de deterioro de materiales metálicos se caracteriza dependiendo de la naturaleza del material y de las condiciones ambientales a las que se está expuesto, algunos factores de mayor incidencia en el efecto de la corrosión son:

- A. Acidez de la solución: Debido a la capacidad de aceptar electrones, las soluciones ácidas son más corrosivas que las soluciones tanto neutrales ($\text{pH} = 7$) como alcalinas ($\text{pH} > 7$) ya que permiten que la zona anódica reaccione en mayor proporción, ya que se liberan electrones de tales reacciones, establecido por Charng T. y Lansing F.⁷⁹
- B. Sales disueltas: Las sales ácidas, al diluirse en la solución electrolítica, disminuyen su pH, acelerando el proceso de corrosión por el efecto de acidez., de acuerdo con Charng y Lansing⁸⁰. Por otro lado, las sales alcalinas, incrementan el pH de la solución electrolítica, por lo que en algunos casos funcionan como inhibidores del proceso de corrosión, conforme lo planteado por Salazar-Jiménez, J.⁸¹
- C. Concentración de oxígeno: La concentración de oxígeno en el medio electrolítico puede acelerar o retardar el proceso de corrosión, dependiendo de la naturaleza del material considerado por Charng y Lansing⁸². Para el caso de materiales ferrosos, al aumentar la concentración de O_2 , aumenta la velocidad de corrosión pues el producto corrosivo no protege al material. Mientras que para materiales pasivables, cuan mayor sea la concentración de O_2 , mayor capacidad tendrá el

⁷⁷ ZHANG, X.G. Ibit., p 130.

⁷⁸ CICEK. Op Cit., p 106.

⁷⁹ CHARNG, T., & LANSING, F. Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility (Reporte). United States. 1982. p. 42-69

⁸⁰ CHARNG, T., & LANSING, F. Ibit., p 48.

⁸¹ SALAZAR-JIMÉNEZ. Op Cit., p 133.

⁸² CHARNG, T., & LANSING, F. Op Cit., p 50.

material de formar la capa protectora que lo caracteriza como lo afirma Salazar-Jiménez, J.⁸³

- D. Temperatura: La velocidad de corrosión tiende a aumentar al incrementar la temperatura, debido a que se acelera la difusión del oxígeno del medio hacia el material afectado.
- E. Velocidad de flujo: En sistemas de transporte de fluidos, al aumentar la velocidad de flujo del medio, aumenta la tasa de corrosión, debido a que permite a las sustancias corrosivas alcanzar y atacar zonas aún no afectadas, y evita en cierta medida la formación y/o acumulación de capas resistentes a la corrosión que protejan al material por efecto erosivo, así como lo establece Charng y Lansing.⁸⁴

2.2.3.3. Protección contra la corrosión.

De acuerdo con ASTM INTERNAT⁸⁵ hay cinco métodos principales de control de la corrosión:

- I. Selección de material: Los materiales deben elegirse cuidadosamente en función de la aplicación en la que se utilizarán, la ubicación geográfica, las características físicas y químicas del entorno, las condiciones de temperatura y presión, otros materiales con los que el material entrará en contacto, etc. Se debe tener en cuenta la resistencia a la corrosión, la facilidad de producción, la abundancia y el costo, conforme a Volkan Cicek⁸⁶
- II. Recubrimientos: Proporcionan resistencia química y mecánica y además pueden ofrecer protección térmica. En lo descrito por Salazar-Jiménez, J⁸⁷ Existe el *recubrimiento orgánico* que incluye sustancias a base de polímeros (pinturas) incrementando tanto la resistividad eléctrica como la iónica, cortando el ciclo de corrosión; y el *recubrimiento inorgánico* que emplea el método de anodizado, por medio del uso de una corriente eléctrica sobre el material por proteger, de modo que, el potencial electroquímico del sistema induzca a un comportamiento anódico a dicho material, generando el desarrollo de una capa de pasivación.

⁸³ SALAZAR-JIMÉNEZ. Op Cit., p 134.

⁸⁴ CHARNG, T., & LANSING, F. Op Cit., p 51.

⁸⁵ ASTM International. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. En: *Designation: G 1-90*. US: ASTM International. 1999. p. 1-7

⁸⁶ CICEK. Op Cit., p 109

⁸⁷ SALAZAR-JIMÉNEZ. Op Cit., p 135.

- III. Inhibidores: El principal objetivo es interrumpir el proceso electroquímico por el cual se forma la celda de corrosión entre el metal y los líquidos presentes en el sistema, afirma BRUCE-MACKAY⁸⁸. Por su parte, Salazar-Jiménez, J⁸⁹ describe el *inhibidor anódico* o pasivador como una sustancia oxidante que aumenta el potencial electroquímico para proteger el sistema y el *inhibidor catódico* el cual, controla el pH del medio corrosivo, evitando que las reacciones conduzcan a la reducción de iones de hidrogeno o de oxígeno.
- IV. Protección catódica: de acuerdo con Salazar-Jiménez, J⁹⁰ este tipo de protección radica en modificar relativamente el valor del potencial electroquímico del material por preservar, haciendo que este material se comporte como un cátodo. Por tanto, se evita la corrosión o disolución del metal. En ASTM INTERNAT⁹¹ se enuncian dos métodos de aplicación, que difieren según la fuente de la corriente protectora. Un sistema de *corriente impresa* que utiliza una fuente de energía para forzar la corriente desde los ánodos inertes a la estructura a proteger y un sistema de *ánodos de sacrificio* utiliza ánodos metálicos activos, por ejemplo, zinc o magnesio, que se conectan a la estructura para proporcionar la corriente de protección catódica.
- V. Diseño: La geometría de la estructura no debe permitir la acumulación de productos de corrosión, como la retención de humedad, por tanto, el diseño debe permitir un drenaje completo en el caso de una parada, así como un lavado fácil. La aplicación de principios de diseño racionales puede eliminar muchos problemas de corrosión y reducir en gran medida el tiempo y el costo asociados con el mantenimiento y la reparación de la corrosión, afirmo Volkan Cicek⁹²

⁸⁸ BRUCE-MACKAY. Nausha Askar. Op Cit., p 40.

⁸⁹ SALAZAR-JIMÉNEZ. Op Cit., p 135.

⁹⁰ SALAZAR-JIMÉNEZ. Ibit., p 136.

⁹¹ ASTM International. Op Cit., p 4.

⁹² CICEK. Op Cit., p 110.

2.2.3.4. Ambientes corrosivos

Los problemas de corrosión más importantes ocurren en tres tipos de ambientes: la atmosfera, agua potable y salada, y sustancias químicas: ácidos, álcalis, sales, identificados por Flinn & Trojan⁹³:

- Corrosión atmosférica: la pérdida anual en lo Estados Unidos es de 2 billones de dólares por causa de la corrosión atmosférica. Después de mucha experimentación, los ingenieros especializados en corrosión han encontrado tres ratas de corrosión diferentes en ambientes industriales, marinos y rurales. En las atmósferas marinas el principal problema es la aspersión de sal. En las atmosferas rurales la lluvia y el polvo causan los problemas principales.
- Corrosión por agua: el ataque del agua fresca varía en forma amplia, dependiendo de las sales y gases que lleva disueltos. Los principales contaminantes son iones de cloro, compuestos de azufre, de hierro y sales de calcio. Hay poca diferencia en la reacción que presentan los aceros simples al carbono y los de baja aleación. El hierro fundido y el dúctil se emplean comúnmente para la tubería de agua. En las uniones críticas, tales como válvulas para las superficies de empate, generalmente se especifican aleaciones de cobre.

El agua de mar ataca el acero común y el hierro fundido muy rápidamente, para ello se utiliza la protección con pintura o un ánodo sacrificable. Por ejemplo, para los barcos marinos se atornillan ánodos de sacrificio de zinc a intervalos en el casco. En agua salada pueden presentarse corrosión por picaduras en el acero inoxidable, y el latón con menos del 80% de cobre, puede dezincificarse. El titanio tiene excelente resistencia al agua salada.

- Corrosión química: las industrias químicas y del petróleo tienen los problemas más graves de corrosión química. En la industria del petróleo, el agua salada, los sulfitos, ácidos orgánicos y otros contaminantes aceleran la corrosión.

2.2.3.5. Recubrimiento protector

Genera un aislamiento eléctrico del material mediante recubrimiento o pintura, formador de película, que protege la superficie sobre la cual fue aplicada por los efectos del medio ambiente. Por lo tanto, los recubrimientos son usados para aislar las regiones anódicas y catódicas e impiden la difusión del oxígeno o del

⁹³ FLINN & TROJAN. Op. Cit., p. 134.

vapor de agua, los cuales son una gran fuente que inicia la corrosión o la oxidación. Existen varios tipos de recubrimientos que se relacionan a continuación.

- Recubrimientos no metálicos: en este grupo están las pinturas, barnices, lacas, resinas naturales o sintéticas, también las grasas, ceras o aceites, empleados en el almacenamiento o transporte de metales ya manufacturados y que proporcionan una protección contra la corrosión temporal.
- Los recubrimientos orgánicos de materiales plásticos son los esmaltes vitrificados resistentes a las condiciones ambientales, al calor y a los ácidos.
- Los recubrimientos metálicos que difieren del metal por proteger se aplican como capas delgadas para separar el ambiente corrosivo del metal, se aplican algunas veces de manera que puedan servir como ánodos de sacrificio que se corroan en vez del metal subyacente. Por ejemplo, el recubrimiento del zinc sobre el acero para hacer acero galvanizado es anódico para el acero y se corroe de manera sacrificada.

Estos recubrimientos metálicos se pueden obtener mediante la electrodeposición de metales como el níquel, zinc, cobre, cadmio, estaño, cromo, entre otros. En ese sentido, Ibáñez⁹⁴ afirma que la electrodeposición es una técnica que permite la obtención de recubrimientos con propiedades particulares del material que se recubre. Las características morfológicas y estructurales de los recubrimientos obtenidos electroquímicamente han sido bastante estudiadas, dados los parámetros que se emplean en la electrodeposición, pues han evidenciado resultados muy favorables.

El proceso de electrodeposición de metales, de acuerdo con Molina⁹⁵, consiste en hacer pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en una disolución (electrolito) que contiene principalmente los iones metálicos que se van a depositar en la superficie de uno de los electrodos (cátodo), en consecuencia, el proceso involucra la formación de una nueva fase sobre el sustrato, la cual proporciona resistencia a la corrosión a su metal núcleo. Por ejemplo, Smith &

⁹⁴ IBÁÑEZ LLANO, Ana. Estudio de las propiedades mecánicas de recubrimientos obtenidos mediante electrodeposición. Madrid. 2004. Trabajo de investigación (Doctorado en Física). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Departamento de Física Aplicada.

⁹⁵ IMAZ MOLINA, Naroa. Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para obtención de recubrimientos metálicos. Barcelona. 2013. p. 8. Trabajo de investigación (Doctorado en Electroquímica, ciencia y tecnología). Universidad de Barcelona. Departamento de Química-Física. Faculta de Química.

Hashemi⁹⁶ dicen que algunos aceros se revisten con una delgada capa de acero inoxidable, este proceso de revestimiento también se utiliza para proporcionar ciertas aleaciones de aluminio de alta resistencia con una capa exterior resistente a la corrosión.

2.2.3.6. Velocidad de corrosión

De acuerdo con la ASTM G-102-89⁹⁷, los valores de *la corriente de corrosión* se pueden obtener a partir de celdas galvánicas y mediciones de resistencia a la polarización. El primer paso es convertir el valor de corriente medido o estimado en densidad de corriente. Esto se logra dividiendo la corriente total por el área geométrica del electrodo expuesto a la solución.

$$i_{cor} = \frac{I_{cor}}{A} \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} i_{cor} &= \text{Densidad corriente de corrosión, } \mu A/cm^2 \\ I_{cor} &= \text{Corriente total, } \mu A \\ A &= \text{Área de exposición, } cm^2 \end{aligned}$$

Se pueden utilizar otras unidades en este cálculo. En algunos equipos de polarización computarizados, este cálculo se realiza automáticamente después de que el área de la muestra se programa en la computadora.

El *peso equivalente*, EW, puede considerarse como la masa de metal en gramos que se oxidará por el paso de un Faraday de carga eléctrica. Para elementos puros, el peso equivalente viene dado por:

$$EW = \frac{W}{n} \quad (2)$$

⁹⁶ SMITH & HASHEMI. Op. Cit., p 235.

⁹⁷ ASTM International. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. En: Designation: G 102-89. US: ASTM International. 1994. p. 416-422

Dónde:

W = *Peso atomico del elemento*, g

n = el número de electrones necesarios para oxidar un átomo del elemento en el proceso de corrosión, es decir, la valencia del elemento.

Para calcular el peso equivalente de la aleación, se puede utilizar el siguiente enfoque. Considere una unidad de masa de aleación oxidada. El electrón equivalente a 1 g de una aleación. Q es entonces:

$$Q = \sum \frac{nifi}{Wi} \quad (3)$$

Dónde:

fi = *Fraccion de masa del elemento i de la aleación*

Wi = *Peso atomico del elemento i de la aleación*

ni = *Valencia del elemento i de la aleación*

Por lo tanto, el peso equivalente de la aleación, EW , es el recíproco si esta cantidad:

$$EW = \frac{1}{\sum \frac{nifi}{Wi}} \quad (4)$$

Las asignaciones de valencia para elementos que poseen valencias múltiples pueden crear incertidumbre. En la tabla 1 de las ASTM⁹⁸ se encuentran algunos valores típicos de EW para una variedad de metales y aleaciones.

La ley de Faraday se puede utilizar para calcular la *tasa de corrosión*, ya sea en términos de tasa de penetración, CR , o tasa de pérdida de masa, MR .

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} EW \quad (5)$$

$$MR = K_2 i_{cor} EW \quad (6)$$

Dónde:

CR = *Dado en $\frac{mm}{yr}$, i_{cor} en $\mu A/cm^2$*

$K_1 = 3.27 \times 10^{-3}$, *mmg/ μA*

$MR = G/m^2 d$

⁹⁸ ASTM International. Op Cit., p 420.

$$K_2 = 8.954 \times 10^{-3}, gcm^2/\mu Am^2d$$

EW es considerada adimensional en ese cálculo.

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1 Técnicas para caracterización

2.3.1.1. Microscopía electrónica de barrido MEB-EDX

La microscopía electrónica de barrido y de transmisión es utilizada como una de las técnicas más versátiles en el estudio y análisis de las características microestructurales de objetos sólidos, según Skoog⁹⁹, basada en el uso de un haz de electrones que generan imágenes amplias de superficies sólidas. Tiene la posibilidad de ofrecer imágenes de alta calidad por el hecho de utilizar como fuente de radiación electrones y no luz visible a escala del ojo humano, alcanzando una alta resolución y profundidad de campo, lo que hace que sea una técnica asertiva para el estudio morfológico de los materiales.

El microscopio electrónico según Delgado¹⁰⁰ emplea radiación electrónica mediante ondas de electrones (longitud de onda λ entre 0,006 y 0,087 nm) acelerados en el vacío, los cuales interactúan con el material y obtienen la información sobre la topografía, composición del espécimen, estructura cristalográfica, potencial eléctrico y campo magnético local.

Según Ipohorski, “los microscopios electrónicos de barrido constan de un cañón electrónico en una columna de alto vacío del orden de 10^{-5} mm de Hg, en la cual se genera un haz de electrones de alta energía (5-30kV). Este haz es colimado por una serie de lentes electrónicas y focalizado sobre la muestra analizada. Los detectores registran las señales originadas por la interacción entre el haz de electrones y la muestra, que son procesadas y visualizadas en el sistema final de observación”¹⁰¹.

La imagen se forma a partir de las señales emitidas por la muestra y se va formando a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una zona de la superficie, las cuales darán lugar a la imagen. Esas señales de acuerdo con

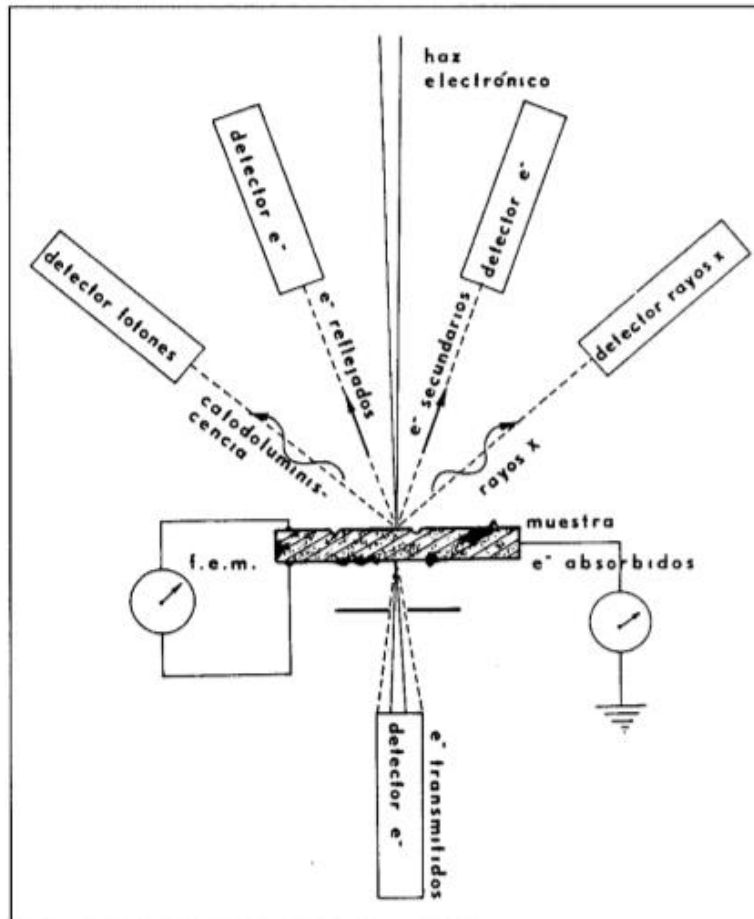
⁹⁹ SKOOG, Douglas; HOLLER, James & NIEMAN, Timothy. Principios de análisis instrumental. 5ta Ed. Madrid: McGraw-Hill. 2001. Citado por: CAMACHO PUEBLA, Ana Laura. Technological viewpoints: historical technology, materials and conservation: sem and microanalysis. En: Intervención. México D.F.: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía. 2013, Vol.4, No.8.

¹⁰⁰ DELGADO, (Nombres), *et al.* El uso del microscopio electrónico de barrido como técnica básica en el estudio de los peloides. En: MARAVER, Francisco; VELA, Lorena y ANKLI, Walter J. IV Congreso Iberoamericano de Peloides IV CIBAP BOÍ 2015. Madrid: Secretaría Técnica Fase 20. 2015, pp. 217-227.

¹⁰¹ IPOHORSKI, Miguel y BOZZANO, Patricia B. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. En: Ciencia e Investigación. Argentina: Asociación argentina para el progreso de las ciencias. 2013, Tomo 63, Número 3, pp. 43-53.

Piqueras¹⁰², se clasifican en tres grupos, las señales con carácter de ondas electromagnéticas, como rayos x y catodoluminiscencia, las señales compuestas por e^- reflejados, e^- secundarios, transmitidos y absorbidos, y finalmente las señales de fuerza electromotriz que se da en especímenes semiconductores (Figura7).

Figura7. Tipos de señales emitidas por la muestra en el SEM tras la interacción con el haz de electrones



Fuente: RENAU-PIQUERAS, Jaime y FAURA, Magdalena. Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido.

El microscopio electrónico de barrido no forma una imagen real del objeto, sino que, a partir de las señales mencionadas anteriormente, de acuerdo con Ipohorski¹⁰³, se construye una imagen virtual. Dicha imagen se visualiza en un tubo de rayos catódicos donde las bobinas de deflexión del haz están

¹⁰² RENAU-PIQUERAS, Jaime y FAURA, Magdalena. Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido. En: MÉNDEZ, Josefina; RODRÍGUEZ, Ana María y CERDÁN, María Esperanza. II Reunión Científica en Biología Celular y Molecular: técnicas de microscopía, micromanipulación y análisis de imagen. Coruña: Universidade da Coruña. 1994, pp. 73-92.

¹⁰³ Ipohorski, 2013. Op. Cit., p 46.

sincronizadas con el barrido del haz de electrones en el microscopio y modulando la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos se obtiene el registro punto a punto en el visualizador como imagen electrónica.

El MEB está equipado con detectores que permiten recibir diferente información, como lo expresan la Universidad de Málaga a través de SCAI¹⁰⁴ y la Universidad Politécnica de Valencia¹⁰⁵, el detector de electrones secundarios (SE) que arroja imágenes topográficas de alta resolución en blanco y negro, el detector de electrones retro dispersados (BSE) para obtener imágenes de composición y topografía de la superficie de la muestra, dada la sensibilidad a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, y el detector de energía dispersiva de rayos x EDS, el cual colecta los rayos X que se generan en cada uno de los puntos de la muestra sobre los que pasa el haz de electrones. La energía de cada rayo X es distintiva de cada elemento, proporciona información sobre la composición química con una información analítica cualitativa y cuantitativa de áreas de la superficie, por lo que se conoce como Microanálisis por EDS. En consecuencia, como menciona Camacho¹⁰⁶, la SEM y la SEM-EDS que permite obtener perfiles analíticos y mapas de distribución de elementos por EDS, se utilizan para contrastar las características morfológicas y la composición de los materiales.

Con la microscopía electrónica de barrido (SEM) es posible observar muestras en tres dimensiones. Las imágenes que se forman en el SEM dependen en gran medida de la gran variedad de interacciones que sufre el haz de electrones en el espécimen y las señales que emite la misma. En el SEM según Díaz¹⁰⁷, las interacciones pueden ser divididas en dos clases:

- Fenómenos de dispersión elástica: que afectan las trayectorias del haz de electrones dentro del espécimen sin alterar la energía cinética de los electrones, esta se da por la desviación del electrón incidente por el núcleo atómico de la muestra o por los electrones de la capa exterior con energía similar. Los electrones incidentes que son elásticamente dispersados por un

¹⁰⁴ SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN (SCAI). Microscopía Electrónica de Barrido. Málaga: Universidad de Málaga. {En línea}. {26-03-2020}. Disponible en: <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>.

¹⁰⁵ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Servicio de Microscopia Electrónica. {En línea}. {11-05-2020}. Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/indexc.html>.

¹⁰⁶ CAMACHO PUEBLA, Ana Laura. Technological viewpoints: historical technology, materials and conservation: sem and microanalysis. En: Intervención. México D.F.: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía. 2013, Vol.4, No.8, pp. 74.

¹⁰⁷ DIAZ BARRIGA CASTRO, Enrique. Síntesis y caracterización de nanoalambres con composiciones y propiedades microestructurales y magnéticas diseñadas. Monterrey, México. 2014. p. 12. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencias en Ingeniería Física Industrial). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. División de estudios de posgrado.

ángulo de más de 90° se llaman electrones retro dispersados (BSE) y generan una señal útil para producir la imagen de la muestra.

- Eventos de dispersión inelástica: afirma Laguna¹⁰⁸, dan como origen a diferentes tipos de señales como resultado de la pérdida de energía o transferencia de energía a los átomos del espécimen que conducen a la generación de electrones secundarios (SE), que son definidos como poseedores de energías de menos de 50eV y pueden ser usados para obtener la imagen o analizar la muestra.

2.3.2. Técnicas Electroquímicas

2.3.2.1. Resistencia a la polarización lineal (RPL)

Es una de las técnicas de monitoreo continuo más comúnmente usada en la determinación de la velocidad de corrosión, y según Tristanchó¹⁰⁹ puede definirse como la resistencia que ofrece un material a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo.

Como lo establece la ASTM G59¹¹⁰, en la prueba se aplica una polarización del potencial pequeño $\Delta E(t)$ definido con respecto al potencial de corrosión $\Delta E = E - E_{corr}$ que se aplica a la muestra de material. En tal sentido, la resistencia a la polarización R_p de un electrodo de trabajo se define a partir de la ecuación (7) que relaciona la pendiente de un gráfico (Figura 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de potencial vs la densidad de corriente E vs i .

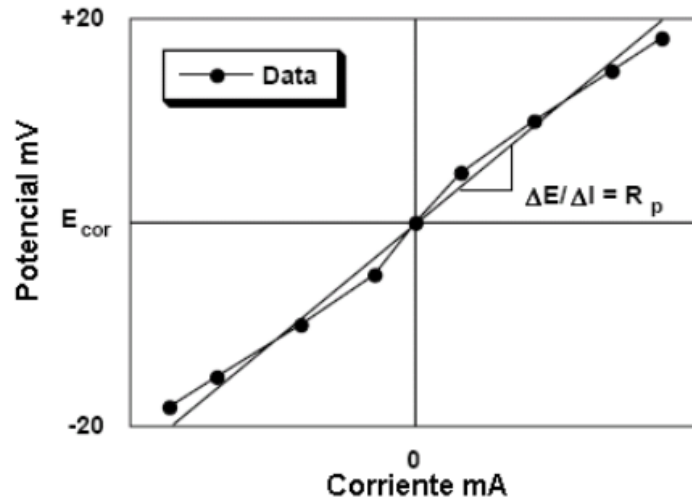
$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial i} \right)_{i=0, dE/dt \rightarrow 0} \quad (7)$$

¹⁰⁸ LAGUNA GALLEGOS, José María. Microscopia electrónica. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. Laboratorio de Microscopia Electrónica. 2015.

¹⁰⁹ TRISTANCHÓ, José Luis. Caracterización por Sales Fundidas de los Recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY. Mediante técnicas electroquímicas. Chihuahua, México. 2011. p. 24. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencia de Materiales). Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

¹¹⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. 1999, ASTM G59 - 97(2014), DOI: 10.1520/G0059-97R14.

Figura8. Diagrama de Resistencia a la Polarización



Fuente: TRISTANCHO, José Luis. Caracterización por Sales Fundidas de los Recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY.

Entonces, la densidad de corriente está dada por i , mientras que la densidad de corriente de corrosión por I_{corr} , por consiguiente, la resistencia a la polarización está relacionada con el coeficiente de Stern – Geary B , donde R_p es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión ecuación (8).

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad (8)$$

Las unidades de las variables son:

i_{corr} = densidad de corriente de corrosión ($\mu A / cm^2$).

B = Coeficiente de Stern-Geary ($V/Decada$).

R_p = Resistencia a la polarización ($\Omega * cm^2$).

El coeficiente de Stern-Geary B ecuación (9), representa una relación entre las pendientes de Tafel anódica b_a y catódica b_c , que describen el flujo de corriente que varía linealmente con la magnitud del potencial de equilibrio.

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (9)$$

Por tanto, se determina la velocidad de corrosión V_{corr} mediante ecuación (10).

$$V_{corr} = 3.27 \times 10^{-3} \frac{i_{corr} EW}{\rho} \quad (10)$$

Donde,

V_{corr} = Velocidad de corrosión expresado en (mpy ó mm/año).

EW = Peso equivalente del material (g).

ρ = densidad del material (g/cm^3).

2.3.2.2. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

Método electroquímico usado en estudios de corrosión, basado en el uso de una señal de corriente alterna (CA) aplicada a un electrodo (metal que sufre corrosión) determinando su respuesta correspondiente. Como lo menciona Báez y Tristanchó¹¹¹ y Cottis¹¹², esta técnica proporciona información completa sobre los fenómenos corrosivos que suceden en la interface electrodo – electrolito.

La espectroscopia de impedancia electroquímica EIS, según Gómez¹¹³ es una técnica de análisis no destructiva, rápida y reproducible, mediante la cual se determina la impedancia del sistema como la respuesta a una señal en corriente alterna que varía en un amplio intervalo de frecuencias.

El procedimiento experimental consiste en la aplicación de una pequeña señal de potencial eléctrico (E) de frecuencia variable al material de estudio o electrodo de trabajo y se mide su respuesta de corriente (I) a diferentes frecuencias dentro de una celda electroquímica. No obstante, como menciona Pletcher¹¹⁴, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema, así, el equipo electrónico usado procesa las

¹¹¹ BÁEZ P., Sandro, *et al.* La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) aplicada al estudio del mecanismo de la corrosión en caliente por sales fundidas. En: Dyna. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2004, Volumen 71. Número 144. pp. 39-47. ISSN 0012-7353.

¹¹² COTTIS, R. & TURGOOSE. Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy. En: NACE International. Houston: National Association of Corrosion Engineers. 1999.

¹¹³ GÓMEZ-GARCÍA, J., *et al.* Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica por espectroscopía de impedancia electroquímica. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Madrid: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2007, Volumen 46. Número 5, pp. 232-239.

¹¹⁴ PLETCHER, D., *et al.* Instrumental Methods in Electrochemistry. 1st edition. Chichester: Horwood Publ. 2001.

mediciones de potencial - tiempo y corriente - tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada, esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”.

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica EIS, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos compuestos por componentes tales como resistencia (R), capacitancia (C), inductancias (L), combinados de tal manera que produzcan espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son llamados circuitos eléctricos equivalentes.

Según Barsoukov y Macdonald¹¹⁵, la impedancia está definida por el cociente entre el potencial aplicado y la intensidad medida de salida. Entonces, la impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica, utilizando circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de Ohm (ecuación (11)).

$$E = IR \quad (11)$$

Donde E es en voltios, I en amperes y R en ohm. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente:

$$E = IZ \quad (12)$$

Donde E es potencial (Volts), I corriente (Amp) y Z impedancia (Ω).

Para Vázquez¹¹⁶, en los materiales y sistemas electroquímicos la impedancia varía con la frecuencia del potencial aplicado, ya que está directamente relacionada con las propiedades de los materiales, esto obedece a la estructura física del material y a los procesos electroquímicos que desarrollen en él. En ese sentido, se realiza una medida de impedancias en un rango de frecuencias determinadas y los resultados se representan en los ejes acorde con los datos obtenidos, es posible relacionarlos con las propiedades físicas y químicas de los materiales y sistemas.

¹¹⁵ EVGENIJ BARSOUKOV, J. & ROSS MACDONALD. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. Second Edition. New York: John Wiley & Sons. 2005.

¹¹⁶ VÁSQUEZ GUTIÉRREZ, José Luis. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. 2007. p. 3. Trabajo de investigación (Máster en Seguridad industrial y medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia. Programa oficial de posgrado.

A partir de la toma de mediciones de desfase y amplitud de respuesta, se obtiene la impedancia de transferencia electroquímica del material en estudio (Z^*).

$$Z = \frac{E_0}{I_0} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega \cdot t + \phi)} = Z_0 \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\sin(\omega \cdot t + \phi)} \quad (13)$$

Donde E_0 es el potencial, I_0 es la intensidad, ω es la frecuencia y ϕ es el desfase. Es así, que la impedancia se expresa en función de una magnitud Z_0 y un desfase ϕ .

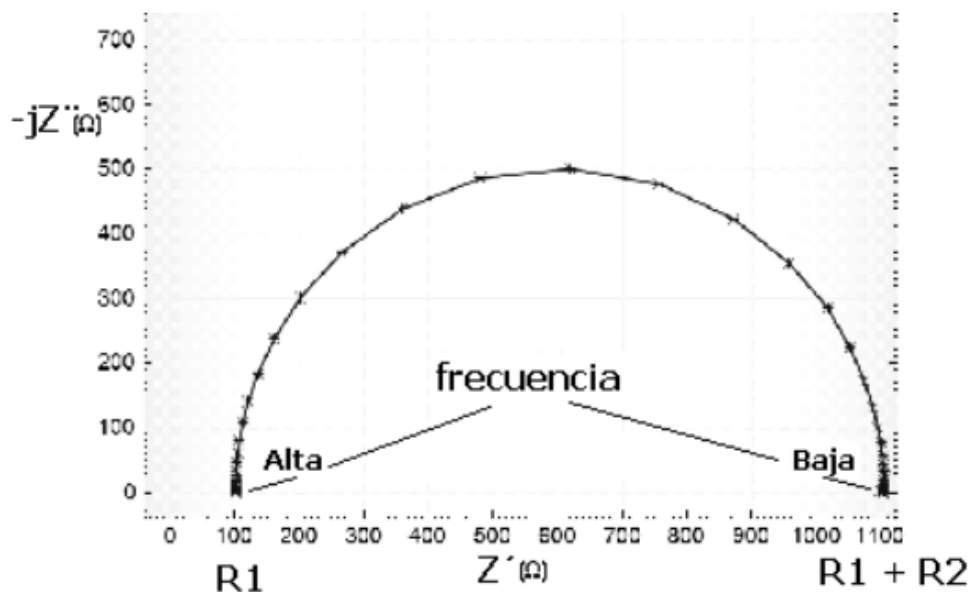
La impedancia puede ser definida por un número complejo, el cual se puede representar en coordenadas cartesianas y polares, de la parte real Z' se calcula la conductancia G y de la parte imaginaria Z'' la capacitancia C , por lo cual se expresaría de la siguiente manera:

$$Z^* = Z' + Z''i = \frac{1}{G} - \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot i \quad (14)$$

Los resultados de impedancia obtenidos de un ensayo de EIS se representan en los Diagramas de Nyquist y Diagramas de Bode. Los diagramas de Nyquist (Figura9), representan la parte imaginaria multiplicada por -1 ($-Z''$), frente a la parte real (Z'), la información que se obtiene se basa en la forma que adoptan los espectros. En los diagramas de Bode (Figura10), se representa el logaritmo del módulo de la impedancia ($\log |Z|$) y el desfase ϕ en función del logaritmo de la frecuencia ($\log \omega$). La información que se obtiene va encaminada al comportamiento en función de la frecuencia.

En el Diagrama de Nuquist (Figura9), cada punto representa el valor de la impedancia a una frecuencia, los datos a bajas frecuencias se encuentran en la parte derecha del diagrama, mientras que los datos de frecuencias altas están a la izquierda de este. Así mismo, se puede estimar el valor de la resistencia de la solución (R_s) como el límite a alta frecuencia de Z' . A partir de la sumatoria de la resistencia a la polarización (R_p) y Resistencia a la solución R_s , se obtiene que es igual al límite de Z' a bajas frecuencias. La capacitancia del sistema, asociada a la doble capa eléctrica (C_{dl}) se puede determinar a partir de la frecuencia en la cima del semicírculo del diagrama de Nyquist y del valor de la resistencia a la transferencia de carga (R_{tc}), la cual se asume como la resistencia a la polarización (R_p), que se aplica en la ecuación de Stern-Geary para determinar las velocidades de corrosión.

Figura9. Diagrama de Nyquist¹¹⁷



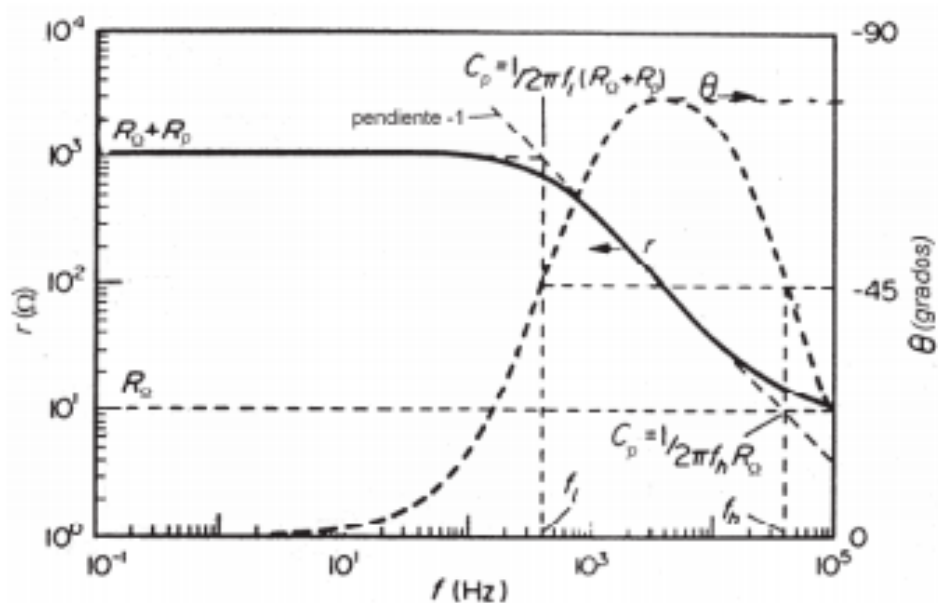
Fuente: Uruchurtu J. y Ramirez J (2011)

En el diagrama de Bode es posible detectar las regiones que son dominadas por los elementos resistivos como resistencia a la solución (R_s) y resistencia a la polarización (R_p), en las que se observa una pendiente de cero, en las regiones dominadas por los elementos capacitivos, caracterizadas por una pendiente de valor de -1. Mediante la observación del trazo generado por el desfase y $\log f$, se determina el pico máximo de $f_{\theta_{max}}$, que es la frecuencia en la que el desfase entre los elementos resistivos y capacitivos es máximo. Estos diagramas de Bode corresponden a representaciones de diferentes parámetros de la impedancia contra la frecuencia y, a diferencia de los diagramas de Nyquist, involucran toda la información del ensayo de espectroscopia de impedancia electroquímica al identificar plenamente la totalidad de las frecuencias.

Figura10. Diagrama de Bode de un circuito eléctrico simple¹¹⁸

¹¹⁷ VÁSQUEZ GUTIÉRREZ. Ibid., p 6.

¹¹⁸ VÁSQUEZ GUTIÉRREZ. Ibid., p 8.



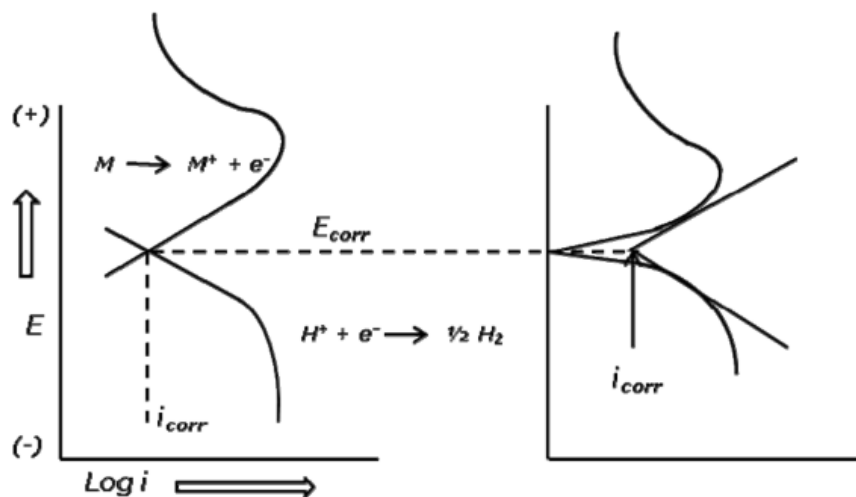
Fuente: VÁSQUEZ GUTIÉRREZ, José Luis. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales

2.3.2.3. Curvas de polarización potenciodinámicas

La curva de polarización potenciodinámica es una herramienta que se utiliza para estudiar la cinética y los mecanismos de reacción del proceso de corrosión, consiste en el control del potencial o corriente, aplicando un barrido a velocidad constante, registrándolo en el rango seleccionado y graficando la corriente generada entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar, a esto se le llama curva de polarización, es la representación gráfica del potencial contra el logaritmo de la densidad de corriente (E vs. $\log i$) (Figura11).

Se manifiestan las curvas de polarización anódica y la curva de polarización catódica. Para esto se utiliza el método de extrapolación de las pendientes de Tafel para calcular la velocidad de corrosión. En el procedimiento galvánico se mantiene constante la densidad de corriente aplicada.

Figura11. Curva de Polarización Potenciodinámica



Fuente: TRISTANCHO, José Luis. Caracterización por Sales Fundidas de los Recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY.

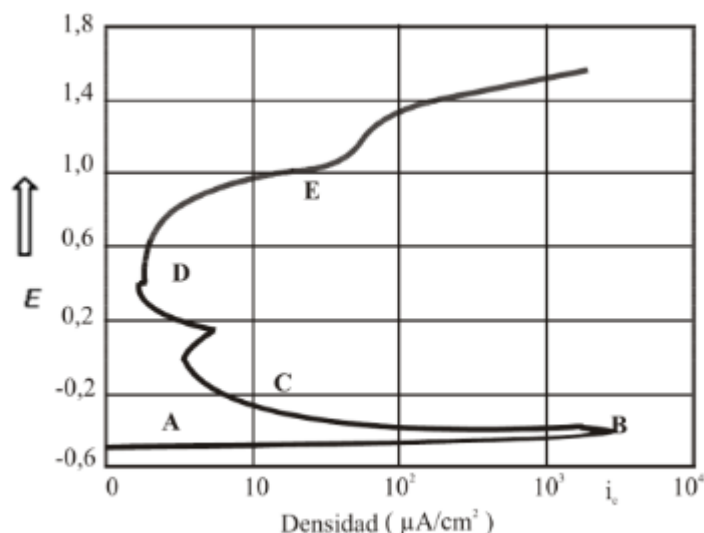
Según Bilurbina¹¹⁹, el potencial del metal en contacto con una determinada disolución, además de que se puede modificar en función del tiempo, cambia de la misma forma en función de la densidad de corriente que se aplique, porque se hace actuar como electrodo de trabajo en una celda electroquímica.

El cambio de potencial a partir del estado de equilibrio, como resultado del flujo de corriente, se conoce como polarización, y la expresión gráfica de la función potencial/densidad de corriente se conoce como polarización.

Las curvas de polarización aportan información relacionada al mecanismo de corrosión donde se involucran las zonas de pasivación y activación, formación y destrucción de películas protectoras sobre metales, en diferentes electrolitos de poder oxidante variable. Para la obtención experimental de las curvas de polarización hay dos posibilidades: controlar la corriente y medir el potencial resultante, que dan lugar a dos técnicas: potenciostática y galvanostática.

¹¹⁹ BILURBINA ALTER, Luis; LEISA MESTRES, Francisco e IRIBARREN, José Ignacio. Corrosión y Protección. Primera edición. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. 2003, p. 77.

Figura12. Polarización anódica de un acero



En la Figura12 se representa un diagrama de polarización anódica de un acero oxidable AISI 430. En la región A es activa, es decir el metal sufre corrosión, el potencial aplicado se hace más positivo. En la región B acaba el aumento de corrosión y empieza el proceso de pasivación, la pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones ambientales se debe, probablemente, a la formación de una película sobre la superficie del metal. Este punto se caracteriza por dos valores, el potencial pasivo y la densidad de corriente crítica.

En la zona C, la corriente disminuye rápidamente al formarse la película pasivante. Se observa a continuación un pequeño pico secundario seguido por la región D, en la que hay una variación en la corriente cuando el potencial aumenta. La película pasivante tiene tendencia a destruirse en la región E, que recibe el nombre de transpasiva.

El diagrama potenciodinámico de polarización anódica suministra la siguiente información:

- La posibilidad de que un material se pasee espontáneamente en un medio determinado.
- La región de potencial en el que la especie permanece pasiva.
- La velocidad de corrosión de la zona pasiva.

2.3.2.4. Ruido electroquímico

Es una técnica electroquímica que según Castañeda¹²⁰ no es destructiva, fue estudiada a finales de los años 70 como un medio para detectar la corrosión general, ataque por picaduras, corrosión por rendijas, cavitación, etc. Al respecto, menciona Malo¹²¹, el ruido, en términos científicos, es aquello que no puede ser explicado en relación con la variabilidad de las mediciones obtenidas a partir de un experimento. La creciente popularidad de las medidas de ruido electroquímico se debe a la posibilidad de utilizar equipamiento de bajo costo, tiempos de análisis menores a otras técnicas electroquímicas y con la posibilidad de obtener información relevante del proceso corrosivo:

- Detección e identificación de corrosión localizada.
- Determinación de la cinética de corrosión.

La señal de ruido afirma Gabrielli¹²², es de baja frecuencia y requiere de equipos digitales muy sensibles que puedan registrar correctamente la información. La selección del intervalo de muestreo debe hacerse con mucho cuidado, pues pueden darse dos fenómenos: primero, un muestreo rápido que trae consigo resultados erróneos a bajas frecuencia y segundo, un muestreo lento que no permite la resolución de la componente de alta frecuencia en el dominio de la frecuencia.

El ruido electroquímico hace referencia a las oscilaciones en el potencial y corriente electroquímica. Según Malo¹²³, en el ruido electroquímico el potencial es la variación u oscilaciones estocásticas del potencial electroquímico del electrodo de trabajo, es decir, el material que se va a analizar respecto al electrodo de referencia; el ruido electroquímico en corriente hace referencia a la variación u oscilación estocástica de la corriente electroquímica.

La medición del ruido electroquímico de potencial y corriente puede hacerse de manera simultánea. El ruido en potencial se realiza a través de la medición de las oscilaciones del potencial de corrosión respecto a un electrodo de referencia. El ruido en corriente se obtiene midiendo las oscilaciones de la corriente entre dos electrodos idénticos o de un solo electrodo bajo control potencioestático.

¹²⁰ CASTAÑEDA, I.; ROMERO, M.; MALO, J.M. y URUCHURTU, J. Ruido electroquímico de la erosión – corrosión en cobre: su relación con los parámetros hidrodinámicos. En: Revista Metalúrgica. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2010, Volumen 46, Número 5, pp. 446-457.

¹²¹ MALO TAMAYO, J.M. y URUCHURTU, J. La técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión. México: Instituto de investigaciones eléctricas. 1997, pp. 1-22.

¹²² GABRIELLI, C.; HUET, F. y KEDDAM, M. Investigation of Metallic Corrosion by Electrochemical Noise Techniques. En: FERREIRA, M.G.S. y MELENDRES, C.A. (Eds). Electrochemical and Optical Techniques for the Study and Monitoring of Metallic Corrosion. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1991. vol 203.

¹²³ MALO TAMAYO y URUCHURTU. Op. Cit., p. 1.

La medición simultánea permite obtener por analogía con la Ley de Ohm la resistencia de ruido electroquímico, y mediante análisis espectral la impedancia de ruido electroquímico. Esta resistencia es equivalente a la resistencia de polarización y en ella se incluyen oscilaciones debidas a la transparencia de carga cinética electroquímica.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología de investigación empleada en la presente investigación estuvo articulada a la evaluación de los recubrimientos metálicos de Cr y Ni aplicados mediante electrodeposición sobre un acero 4130, evaluado en tres (3) electrolitos corrosivos, por medio de técnicas electroquímicas de Ruido Electroquímico (RE), Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) y Curvas de Polarización Potenciodinámica (CPP).

Lo anterior, determinó un método de investigación deductivo, teniendo en cuenta el análisis general de los recubrimientos metálicos y, particularmente, los recubrimientos de cadmio, cromo y níquel, además que consideró los parámetros establecidos para el tipo de pruebas que se realizaron.

Así mismo, se estableció como un tipo de investigación exploratoria, ya que permitió plantear una hipótesis. Dado este tipo de investigación y el estudio del fenómeno de la corrosión, interiorizando conceptos y determinando las variables de estudio que permitieran obtener la información necesaria para descubrir el comportamiento del fenómeno de estudio, y a partir de la construcción de esta base de conocimiento se desarrolló una investigación descriptiva.

Se aplicó un enfoque cuantitativo con la identificación de las características específicas a evaluar, planteamientos concretos y pruebas correctas con el fin de desarrollar un proceso secuencial y probatorio, con la generación de resultados de mayor precisión que permitieran establecer unas condiciones de control sobre el fenómeno de la corrosión.

El enfoque de investigación cuantitativo, según Hernández¹²⁴, utiliza cinco fases similares y relacionadas entre sí:

- a. Llevan a cabo observación y evaluación de fenómenos.
- b. Establecen suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas.
- c. Prueban y demuestran el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento.
- d. Revisan tales suposiciones o ideas sobre la base de las pruebas o del análisis.
- e. Proponen nuevas observaciones y evaluaciones para esclarecer, modificar, cimentar y/o fundamentar las suposiciones o ideas; o incluso para generar otras.

¹²⁴ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la Investigación. 6ª Edición. México. McGraw – Hill. 2014.

3.2. ETAPAS METODOLÓGICAS

Se estableció un proceso de tres etapas alineadas con el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados, las cuales contemplaron una serie de actividades a lo largo del trabajo. De manera transversal a todas las etapas se realizó una revisión bibliográfica en temas de recubrimientos metálicos, corrosión, tipos de corrosión, ambientes corrosivos, Ruido Electroquímico (RE), Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) y Curvas de Polarización (CP), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), dicha revisión se llevó a cabo utilizando bases de datos, libros, revistas de carácter científico, que permitieron la construcción de un estado del arte actualizado y pertinente para la presente investigación.

3.2.1. Etapa 1

Caracterización mediante análisis metalográfico los recubrimientos con Cd(I-II), Cr y Ni en las probetas de acero 4130.

Material

Se realizó la identificación del sustrato del cual están fabricados los trenes de aterrizaje de las aeronaves A-37B. Se emplea como sustrato un acero AISI 4130 que tiene la siguiente composición (Tabla 2) de acuerdo con la ficha técnica de West Yorkshire Steel¹²⁵:

Tabla 2. Composición AISI 4130

Carbono	0.28-0.33%	Cromo	0.90-1.10%
Manganeso	0.40-0.60%	Molibdeno	0.15-0.25%
Silicio	0.10-0.35%	Fosforo	0.035% max
Níquel	0.25% max	Azufre	0.040% max

Los recubrimientos de cadmio, cromo y níquel que se analizaron, fueron obtenidos previamente a través del Comando Aéreo de Mantenimiento donde se realizaron los recubrimientos bajo la técnica de electrodeposición de acuerdo con los

¹²⁵ WEST YORKSHIRE STEEL. AISI 4130 Alloy Steel. {En línea}. {02-08-2017}. Disponible en: <https://www.westyorkssteel.com/alloy-steel/oil-and-gas/aisi-4130/>.

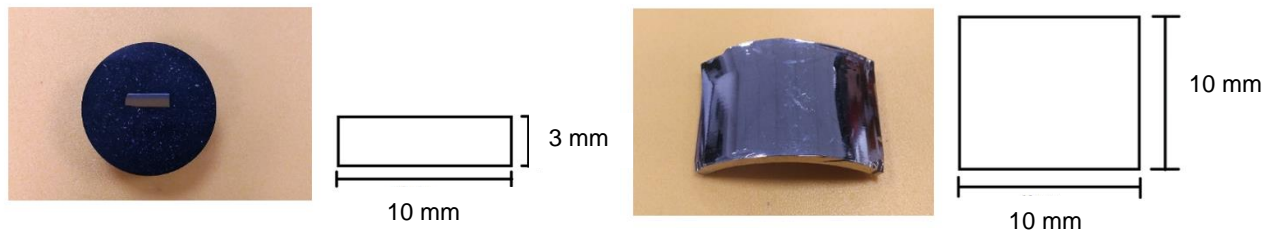
parámetros establecidos en las normas AMS-QQ-P-416B¹²⁶, AMS-QQ-C-320¹²⁷ y AMS-QQ-N-290¹²⁸ respectivamente.

Las muestras fueron preparadas metalográficamente de acuerdo con los parámetros de ASTM E3-11¹²⁹, a las secciones transversales de cada recubrimiento, así como las muestras superficiales, les fue designada una nomenclatura para cada espécimen (Tabla 3), con el fin de obtener una identificación precisa y un perfil adecuado para el análisis. De igual manera, se determinaron las dimensiones de cada probeta (Figura13).

Tabla 3. Nomenclatura de muestras

Muestra	Recubrimiento	Sección
M1	Cadmio Tipo I	Transversal
M2	Cadmio Tipo I	Superficial
M3	Cadmio Tipo II	Transversal
M4	Cadmio Tipo II	Superficial
M5	Cromo	Transversal
M6	Cromo	Superficial
M7	Níquel	Transversal
M8	Níquel	Superficial

Figura13. (a) Muestra sección transversal. (b) Muestra superficial



Pulidora metalográfica

Es este dispositivo se realizó la preparación de la superficie de la muestra, con los diferentes discos de lija que están determinados por el tamaño de grano y paños para obtener un acabado espejo y realizar un análisis acertado (

Figura 14)

¹²⁶ SAE AEROSPACE. Op. Cit., p. 3.

¹²⁷ SAE INTERNATIONAL. Aerospace Material Specification: Chromium Plating. Julio 2000. AMS-QQ-C-320.

¹²⁸ SAE INTERNATIONAL. Aerospace Material Specification: Nickel Plating. Julio 2015. AMS-QQ-N-290.

¹²⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. US: ASTM G1-90. 1999.

Figura14. Pulidora metalografica

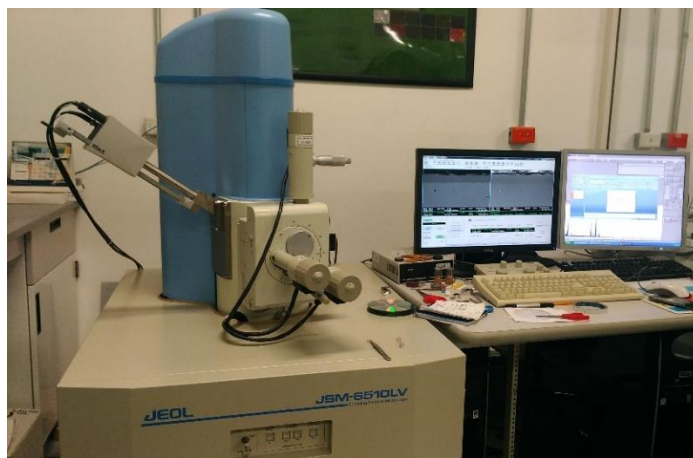


Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/presi/product-87039-822667.html>

Microscopio electrónico de barrido

La caracterización de las muestras de los recubrimientos se realizó con Microscopia Electrónica de Barrido SEM, con el fin de conocer la morfología del recubrimiento y su espesor, así mismo se analizó con energía dispersiva de rayos x EDX para determinar su composición química. Las muestras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM- 6510 LV

Figura15. Microscopio electrónico de barrido



3.2.2. Etapa 2

Aplicación de las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal, curvas polarización potenciodinámicas, espectroscopia de impedancia y ruido

electroquímico, a las probetas de acero 4130 con los recubrimientos de Cd (I-II), Cr y Ni a temperatura ambiente para determinar la velocidad de corrosión.

Medios corrosivos

Se seleccionaron los medios corrosivos en los que se desarrollarían las diferentes pruebas electroquímicas, entendiendo que las aeronaves la mayor parte del tiempo están en el área costera, sometidas a un ambiente salino, pero así mismo realizan operaciones en todo el territorio nacional, por lo que eventualmente están expuestas a otros ambientes. En consecuencia, se establecieron tres medios: H₂O, NaCl al 3.5% y H₂SO₄ al 1%.

Pruebas electroquímicas

Se identificaron las pruebas electroquímicas que permitieran obtener la mayor cantidad de información de calidad, para establecer un comportamiento lo más real posible de la velocidad de corrosión en cada probeta. Se fijaron como pruebas electroquímicas, la resistencia a la polarización lineal, la espectroscopia de impedancia electroquímica, curvas de polarización potencio dinámicas y ruido electroquímico, bajo unas condiciones de 1 atm de presión y temperatura ambiente (en Monterrey, México aproximadamente 28°C).

Las muestras de material con los diferentes recubrimientos a analizar se sometieron a los tres medios corrosivos, con el fin de evaluar el comportamiento y la velocidad de corrosión de cada uno, se emplearon las siguientes pruebas con los respectivos parámetros:

- Ruido Electroquímico: esta prueba fue aplicada a los cuatro recubrimientos (Cd tipo I, Cd tipo II, Cr, y Ni) en exposición a los tres medios corrosivos (NaCl, H₂O, H₂SO₄) bajo los siguientes parámetros: 1024 puntos a una velocidad de 1 punto/segundo.
- Resistencia a la polarización lineal: se aplicó esta técnica a la totalidad de las muestras en los tres medios corrosivos con estos parámetros: velocidad de polarización 10mV/min y una polarización de potencial de ± 20 mV.
- Curvas de polarización cíclicas: la prueba CPC se aplicó bajo los siguientes parámetros: potencial de barrido de -600 a +1000 mV a partir del potencial de corrosión, velocidad 60mV/min.
- Espectroscopia de impedancia electroquímica: la prueba fue aplicada a las muestras mencionadas en los medios corrosivos con los siguientes parámetros: barrido de frecuencias 0.01 Hz a 50000 Hz.

Electrodo de referencia – Electrodo auxiliar

Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Calomel Saturado SCE y como electrodo auxiliar de platino (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Potenciostato/ galvanostato/ZRA

Las pruebas electroquímicas se realizaron en un potenciostato, galvanostato y amperímetro de resistencia cero, con analizador de respuesta de frecuencia y generador de barrido integrados en uno (Figura16)

Figura16. Potenciostato GillAC.

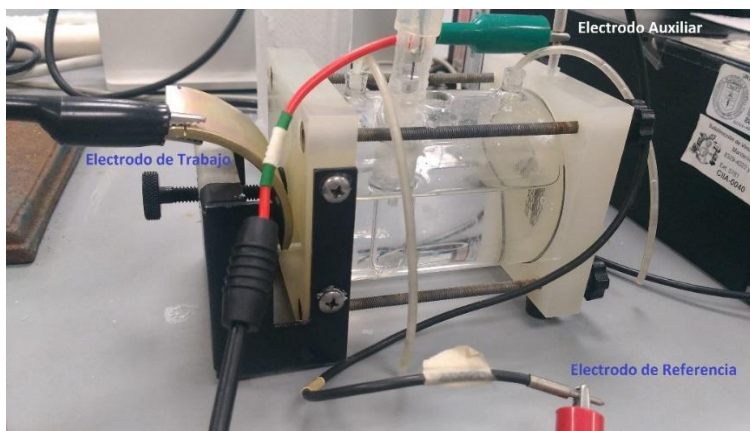


Fuente: <http://www.acminstruments.com/products/lab-instruments/gill-ac>

Celda electroquímica

Las pruebas electroquímicas se realizaron en una celda electroquímica en la que actúan tres electrodos, el electrodo de trabajo, el electrodo auxiliar y el electrodo referencia, así como la solución electrolítica, en este caso las tres soluciones o medios corrosivos a los que se expuso el material (Figura17).

Figura17. Celda electroquímica.



3.2.3. Etapa 3

Comparación de la velocidad de corrosión, mecanismos de reacción, relación entre la interface electrodo y electrolito, así como las características microestructurales, de los recubrimientos base Cd(I-II), Cr y Ni.

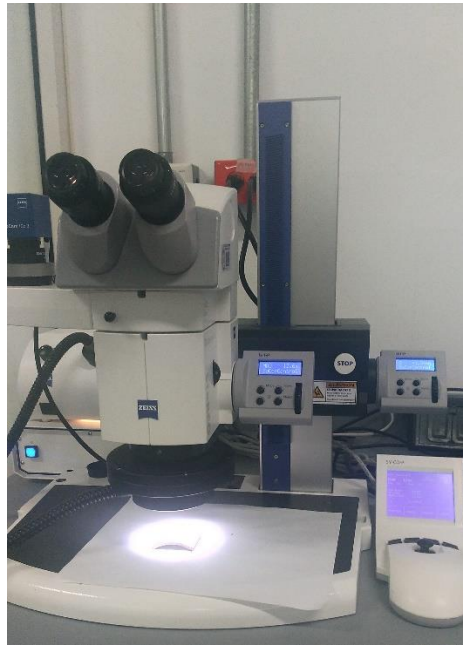
Variables de comparación

Se establecieron las variables para realizar una comparación completa del comportamiento de la corrosión en cada muestra, clasificando los resultados obtenidos en cada medio corrosivo y cada prueba electroquímica.

Estereoscopio

En el microscopio se observaron las muestras antes y después de la aplicación de las pruebas electroquímicas, con el objetivo de observar la morfología de la superficie de cada uno después de cada técnica, este equipo tiene la capacidad de mostrar la imagen hasta 100 aumentos, con la gran ventaja de que puede observarse en tres dimensiones. Se obtuvieron imágenes en 10X, 20X y 50X (Figura18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura18. Estereoscopio.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo de investigación. Este capítulo de resultados está dividido en subcapítulos, los cuales corresponden al cumplimiento de cada uno de los objetivos inicialmente planteados. En este sentido, los capítulos siguen la siguiente secuencia:

4.1. Caracterización mediante análisis metalográfico los recubrimientos con Cd(I-II), Cr y Ni en las probetas de acero 4130.

4.2. Aplicación de las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal, curvas polarización potenciodinámicas, espectroscopia de impedancia electroquímica y ruido electroquímico, a las probetas de acero 4130 con los recubrimientos de Cd (I-II), Cr y Ni a temperatura ambiente para determinar la velocidad de corrosión.

4.3. Comparación de la velocidad de corrosión, mecanismos de reacción, relación entre la interface electrodo y electrolito, así como las características microestructurales, de los recubrimientos base Cd(I-II), Cr y Ni.

4.1. Caracterización mediante análisis metalográfico los recubrimientos con Cd(I-II), Cr y Ni en las probetas de acero 4130.

Se realizó una caracterización de cada recubrimiento de acuerdo con el siguiente orden de muestras:

Tabla 4. Nomenclatura de muestras.

Muestra	Recubrimiento	Sección
M1	Cadmio Tipo I	Transversal
M2	Cadmio Tipo I	Superficial
M3	Cadmio Tipo II	Transversal
M4	Cadmio Tipo II	Superficial
M5	Cromo	Transversal
M6	Cromo	Superficial
M7	Níquel	Transversal
M8	Níquel	Superficial

a. Recubrimiento de Cadmio Tipo I – Sección transversal (Muestra M1).

Aumento a 1000X

Figura19. Recubrimiento Cadmio tipo I con electrones retro dispersados BES M1.

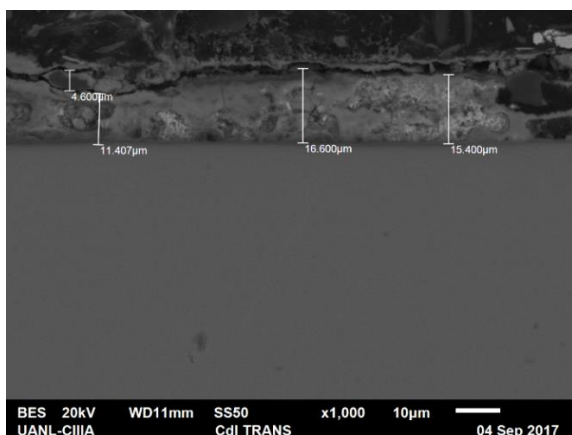
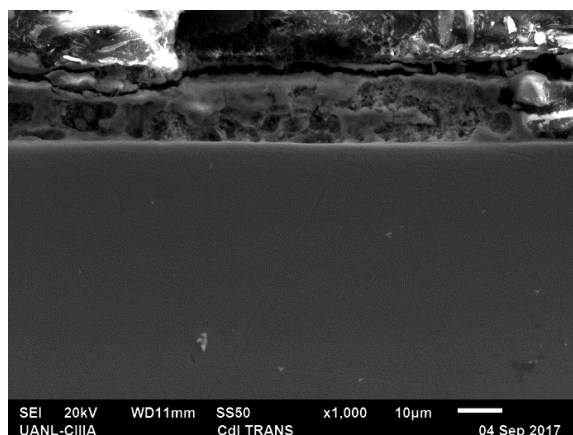


Figura20. Recubrimiento Cadmio tipo I con electrones secundarios SEI M1



En las imágenes se puede observar que el recubrimiento de Cd Tipo I es irregular en la superficie y está fracturado en diferentes zonas, tiene un espesor promedio de 15µm.

La capa del recubrimiento se observa pareja y homogénea, hay separación fuerte entre sustrato y depósito, por lo que tiene alta probabilidad de desprendimiento del recubrimiento. Presenta una capa intermedia entre el sustrato y el depósito que es probablemente química, estructuralmente no son muy compatibles y se manifiesta en la falta de adherencia.

Microanálisis

Figura21. Microanálisis por dispersión de rayos M1

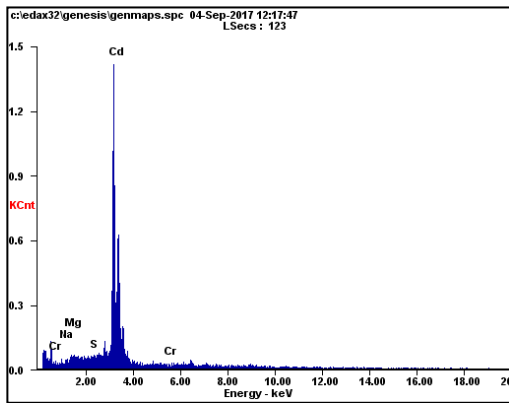


Figura22. Porcentaje de elementos M1

Element	Wt%	At%
NaK	00.92	04.07
AlK	01.63	06.17
ClK	00.44	01.25
CdL	96.49	87.48
CrK	00.52	01.03
Matrix	Correction	ZAF

El recubrimiento de Cd Tipo I es realizado de acuerdo con la especificación AMS-QQ-P-416B, tiene presencia de Na en un 0,92%, Al 1,63%, Cl 0,44%, Cr 0,52% y Cd 96,46%, principalmente, los elementos adicionales al Cd están en el recubrimiento teniendo en cuenta que las soluciones electrolíticas utilizadas son óxido de cadmio CdO , hidróxido de sodio NaOH , cianuro de sodio NaCN y carbonato de sodio Na_2CO_3 .

b. Recubrimiento Cadmio Tipo I – Sección superficial (Muestra M2).

Amento a 2000X

Figura23. Recubrimiento Cd Tipo I BES M2

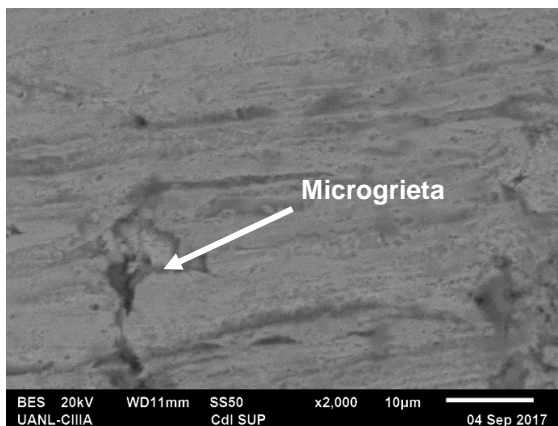
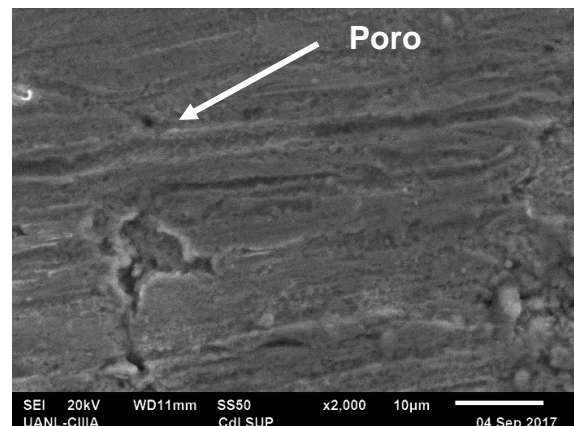


Figura24. Recubrimiento Cd Tipo I SEI M2



En las imágenes de BES y SEI se evidencian irregularidades en la superficie microgrietas y poros en el acabado del recubrimiento. El poro señalado puede obedecer a defectos en la aplicación del recubrimiento, ya que el resto de la capa esta pareja.

Microanálisis

Figura25. Microanálisis por dispersión de rayos M2

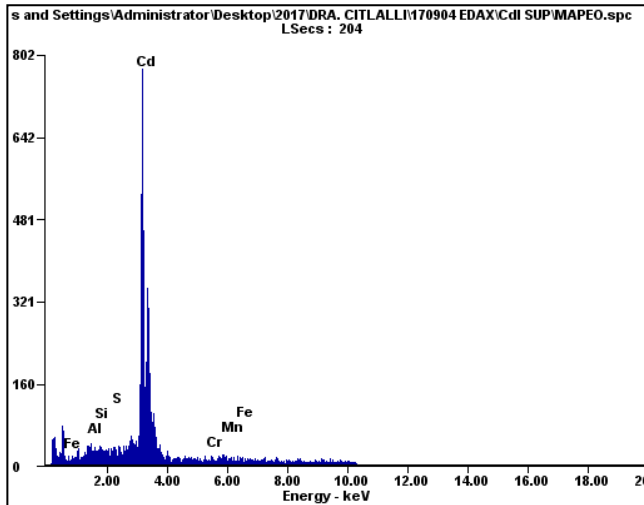


Figura26. Porcentaje de elementos M2

Element	Wt%	At%
AlK	01.00	03.80
SiK	00.83	03.05
SK	00.46	01.47
CdL	95.29	87.13
CrK	00.55	01.09
MnK	00.78	01.46
FeK	01.09	02.00
Matrix	Correction	ZAF

c. Recubrimiento Cadmio Tipo II - Sección transversal (Muestra M3).

Aumento 1000X

Figura27. Recubrimiento Cd Tipo II imagen BES M3

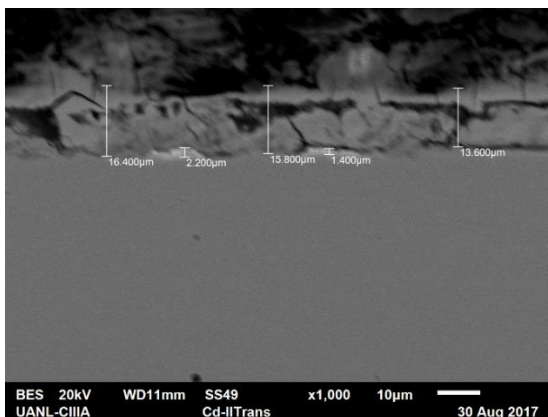
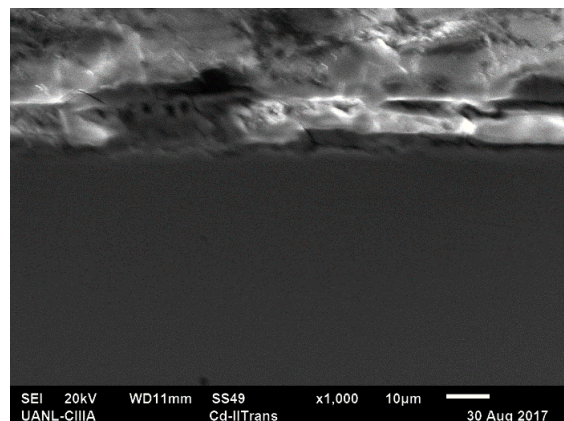


Figura28. Recubrimiento Cd Tipo II imagen SEI M3



En las imágenes se observa que el recubrimiento de Cd Tipo II presenta varias fracturas transversales además de una interfase de más o menos 2μm entre el sustrato y el recubrimiento, pero hay mayor interdifusión respecto al recubrimiento de Cd Tipo I, ya que, aunque hay una línea de separación entre el sustrato y el

depósito, hay mayor adherencia, el espesor promedio del recubrimiento que es de 15µm.

Microanálisis

Figura29 Microanálisis por dispersión de rayos M3

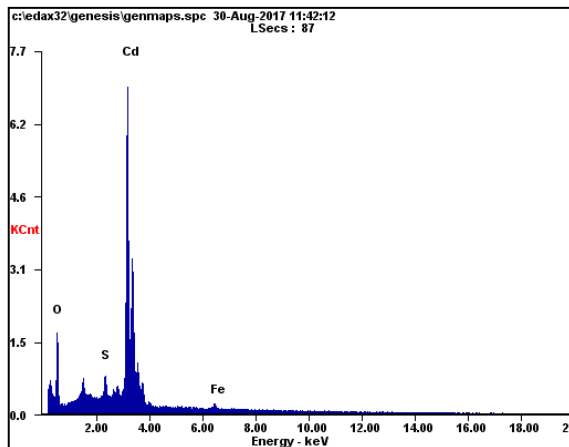


Figura30. Porcentaje de elementos M3

Element	Wt%	At%
OK	24.85	66.35
AlK	02.34	03.71
SK	01.82	02.43
CdL	69.58	26.44
FeK	01.40	01.07
Matrix	Correction	ZAF

En los resultados del microanálisis se observa que además del Cd en un porcentaje del 69,58%, presenta O en un 24,85%, Al 2,34%, S 1,82% y Fe 1,40%, teniendo en cuenta las soluciones electrolíticas que se utilizaron en el proceso de electrodeposición óxido de Cadmio CdO, hidróxido de sodio NaOH, cianuro de sodio NaCN y carbonato de sodio Na₂CO₃.

d. Recubrimiento Cadmio Tipo II – Sección Superficial (Muestra M4).

Aumento a 2000X

Figura31 Recubrimiento Cd Tipo II BES M4

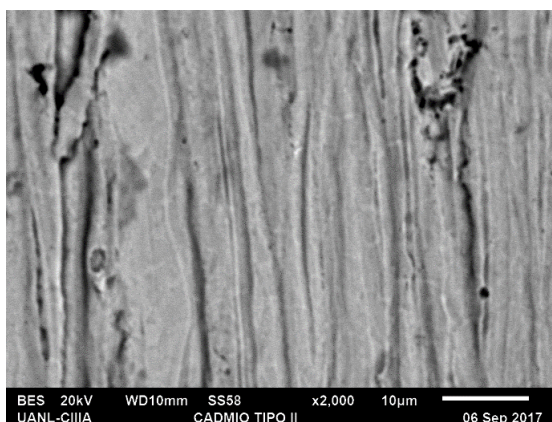
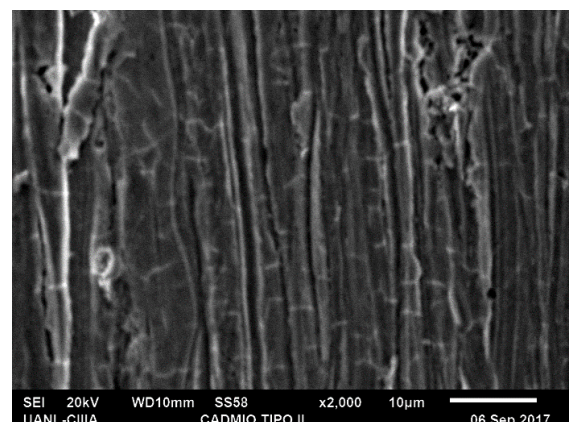


Figura32 Recubrimiento Cd Tipo II SEI M4



Al observar la imagen de BES se notan unas capas o laminillas a lo largo de la superficie, en la imagen de SEI las capas tienen microfracturas y no son completamente compactas entre ellas. El recubrimiento de Cd Tipo II con el tratamiento suplementario de cromo le da mayor dureza.

Microanálisis

Figura33. Microanálisis por dispersión de rayos M4

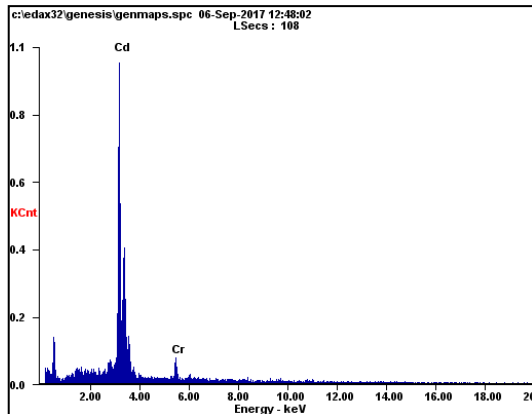


Figura34. Porcentaje de elementos M4

Element	Wt%	At%
CdL	94.96	89.71
CrK	05.04	10.29
Matrix	Correction	ZAF

El proceso de electrodeposición del Cd Tipo II fue realizada de acuerdo con la norma AMS-QQ-P-416B en la que se especifica que el Tipo II tiene un tratamiento suplementario de cromo por lo que se evidencia en la Tabla de Porcentaje de Elementos un 5,04% de Cr y 94,96% de Cd.

e. Recubrimiento Cromo – Sección Transversal (Muestra M5).

Aumento a 1000X

Figura35. Espesor recubrimiento Cr M5

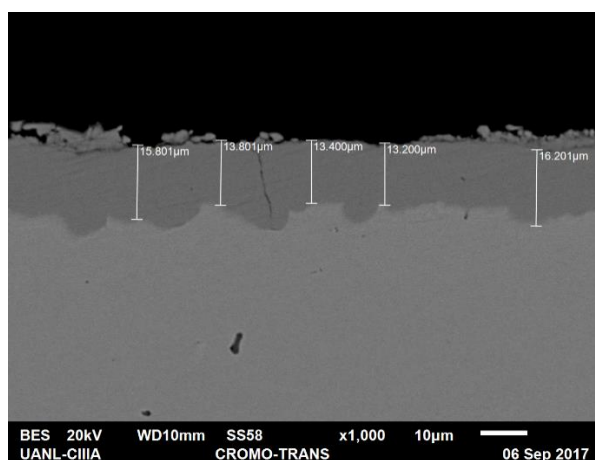
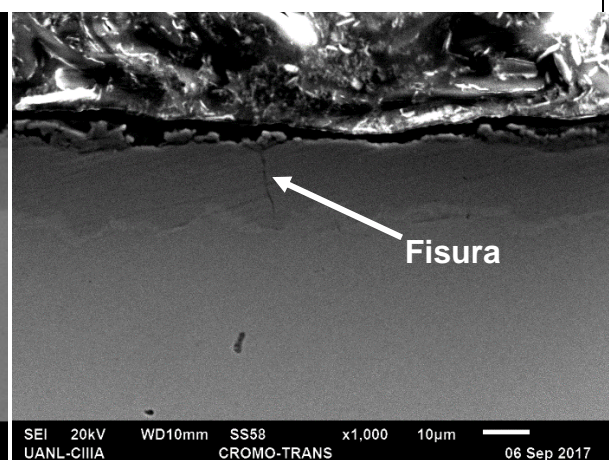


Figura36 Recubrimiento Cr vs sustrato M5



El recubrimiento de cromo sobre el acero AISI 4130 tiene un espesor promedio de 13,5µm, el recubrimiento no está depositado uniformemente sobre el sustrato, por lo que se presenta una línea de separación entre los dos materiales, demostrando que química y estructuralmente no son compatibles, es necesario una capa de un material que mejore la adherencia, adicionalmente presenta una fisura transversal en una zona del recubrimiento, lo que indica que hay grandes diferencias de dilatación y contracción entre un material y el otro. En estos casos, es necesario que, al aplicar una capa intermedia, el material que se utilice tenga la capacidad de absorber las contracciones y dilataciones que se den entre los materiales, además de ser química y estructuralmente similar al sustrato.

Microanálisis

Figura37. Microanálisis por dispersión de rayos M5

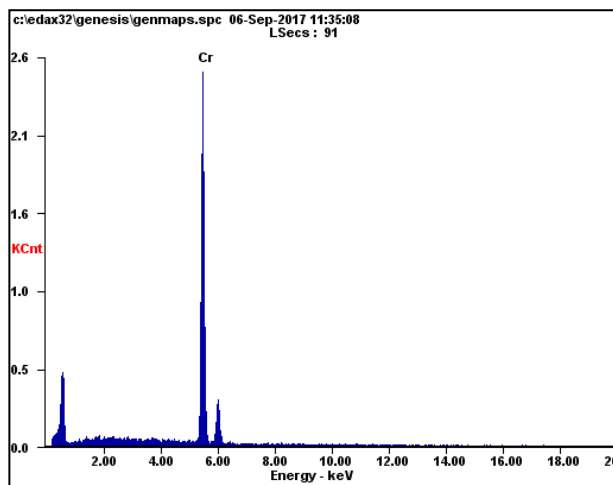


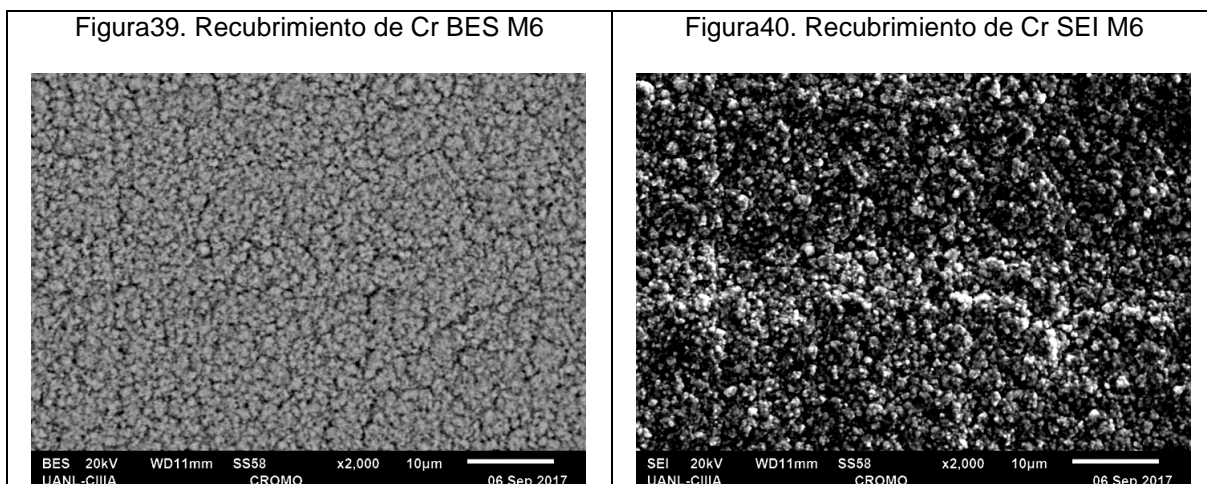
Figura38. Porcentaje de elementos M5

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CrK	100.00	100.00
Matrix	Correction	ZAF

El recubrimiento de cromo se realizó conforme a la norma AMS-QQ-C-320, el resultado del microanálisis arroja un 100% de cromo en el recubrimiento sin efectos adicionales.

- f. Recubrimiento Cromo – Sección superficial (Muestra M6).

Aumento 2000X



En la imagen de BES y la de SEI se notan los granos del recubrimiento bien definidos, no es una superficie uniforme lo que representa un riesgo de fisuras y ranuras.

Microanálisis

Figura41. Microanálisis por dispersión de rayos M6

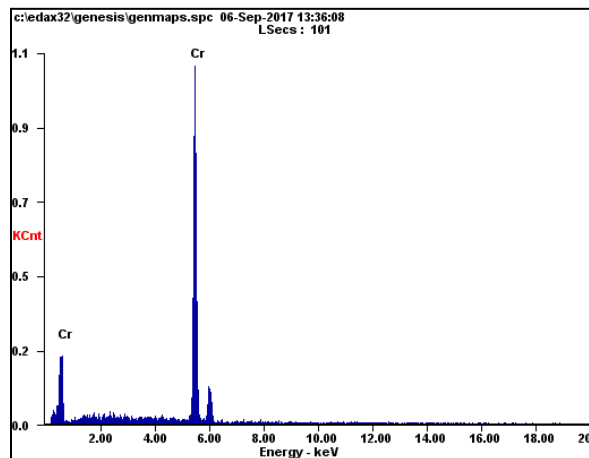


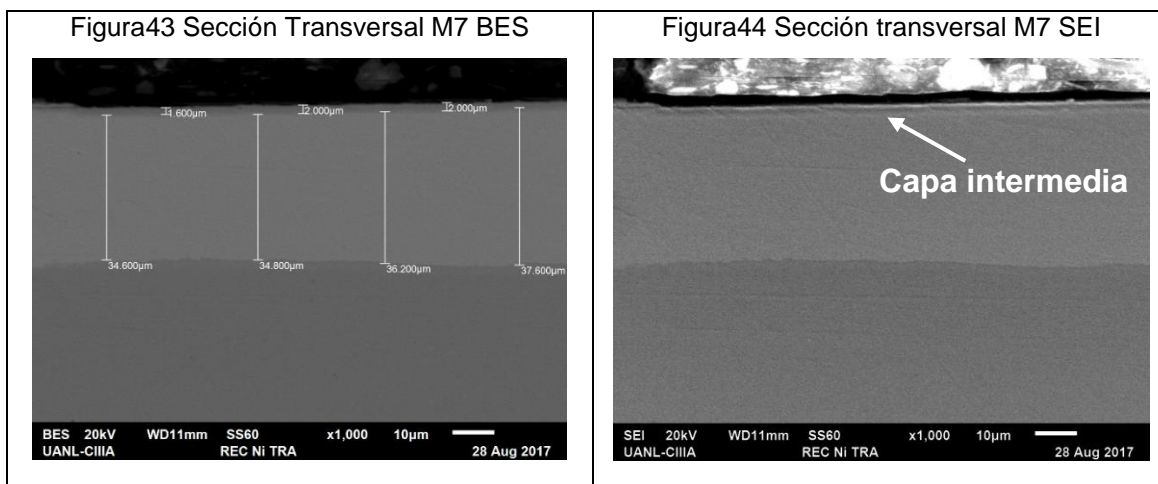
Figura42. Porcentaje de elementos M6

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CrK	100.00	100.00
Matrix	Correction	ZAF

En el análisis se evidencia presencia de cromo al 100%.

g. Recubrimiento de Níquel – Sección transversal (Muestra M7)

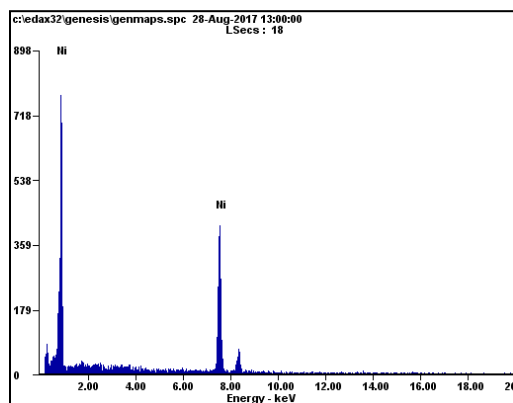
Aumento 1000X



En la Figura43 se observa el recubrimiento de Níquel a un aumento de 1000X. Se puede apreciar que el espesor del recubrimiento sobre el acero mide en promedio 36µm, también se evidencia una capa inicial de 2µm, está completamente homogéneo y adherido al sustrato. El recubrimiento realizado por electrodeposición está sustentado en la norma AMS-QQ-N-290. El níquel es un material ferromagnético lo que permite que haya buena compatibilidad con el acero, además que el níquel tiene una alta tenacidad, propiedad que evita que aparezcan fisuras en el depósito. Se genera una pequeña capa entre el sustrato y el níquel que permite la adherencia de los dos materiales.

Microanálisis

Figura45. Microanálisis por dispersión de rayos M7



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
NiK	100.00	100.00
Matrix	Correction	ZAF

Figura46. Porcentaje de elementos M7

El recubrimiento presente en el acero AISI 4130 es 100% Ni, no tiene otros elementos.

h. Recubrimiento de Níquel – Sección superficial (Muestra M8).

Aumento a 2000X

Figura47. Recubrimiento Ni BES M8

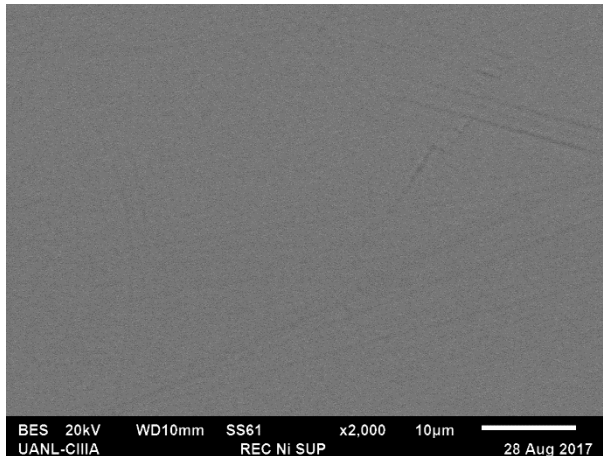
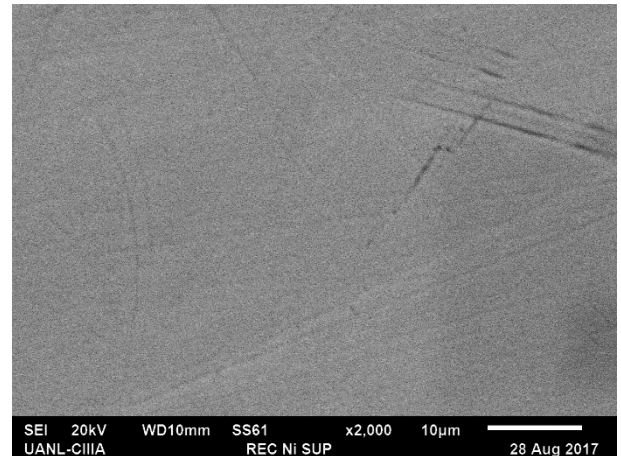


Figura48. Recubrimiento Ni SEI M8



En la Figura47 se observa la imagen de electrones retrodispersados del recubrimiento de Ni superficial con unas ligeras líneas, las cuales se ven más claras en la imagen de electrones secundarios.

Microanálisis

Figura49. Microanálisis por dispersión de rayos M8

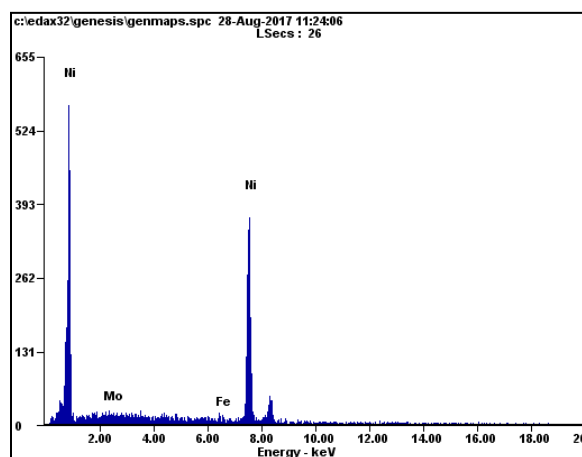


Figura50. Porcentaje de elementos M8

Element	Wt%	At%
MoL	01.63	01.00
FeK	01.63	01.72
NiK	96.74	97.28
Matrix	Correction	ZAF

Al realizar el microanálisis se evidencia presencia del 96.74% de Ni, Mo 1.63% y Fe 1,63%, los dos últimos del sustrato.

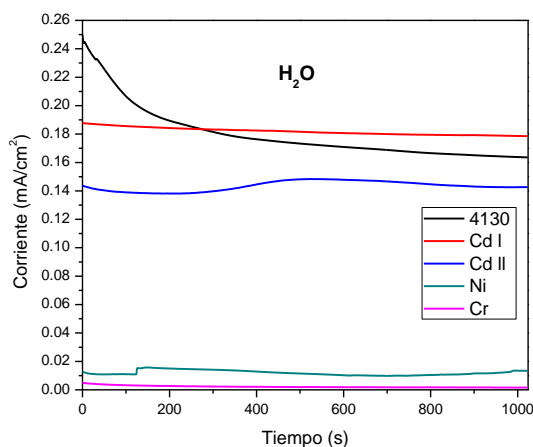
4.2. Aplicación de las técnicas electroquímicas de resistencia la polarización lineal, curvas polarización potenciodinámicas, espectroscopia de impedancia electroquímica y ruido electroquímico, a las probetas de acero 4130 con los recubrimientos de Cd (I-II), Cr y Ni a temperatura ambiente para determinar la velocidad de corrosión.

4.2.1. Ruido Electroquímico

Ruido Electroquímico en H₂O

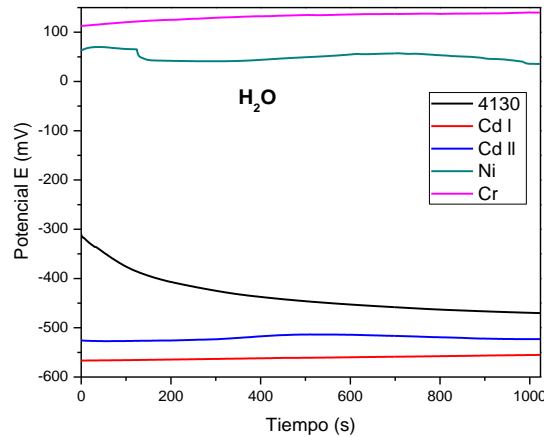
En las Figura51 y Figura52 se muestran las series de tiempo tanto de corriente como de potencial de los diferentes sistemas (AISI 4130, Cd I, Cd II, Ni y Cr) cuando son expuestos en H₂O. En ambas series se observa que no existe un ataque intenso sobre la superficie, debido a que no se presentaron tránsitos en la respuesta de cada variable en función del tiempo. Es claro, que para al acero 4130 existió una disminución considerable de la corriente ($0,249 \text{ mA/cm}^2 - 0,164 \text{ mA/cm}^2$) y una disminución del potencial (-310 mV a -470 mV), lo que puede relacionarse con una resistencia al ruido electroquímico constante durante toda la prueba, es decir, una activación por el corrimiento del potencial a valores más activos y una disminución de la velocidad de las reacciones presentes por la disminución de la densidad de corriente.

Figura51. Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en H₂O.



Fuente: Elaboración propia.

Figura52. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en H₂O.



Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, los recubrimientos de Ni y Cr presentaron menor densidad de corriente ($0,013 \text{ mA/cm}^2$ y $0,00155 \text{ mA/cm}^2$, respectivamente) y potenciales más nobles (35,7 mV y 139,97 mV, respectivamente) con respecto a los demás sistemas, lo que puede relacionarse con mejores características electroquímicas. Para los demás sistemas no fue posible observar cambios aparentes de la densidad de corriente debido a la escala de las mismas gráficas. Por tal razón, se realizaron graficas por separado para analizar los fenómenos presentes durante el tiempo de exposición.

Se puede notar que el comportamiento de la corriente y el potencial para Cd Tipo I (Figura53) y Cr (Figura56) responden de forma similar al tiempo de exposición, hay una breve tendencia a aumentar del potencial a valores más nobles y una disminución de la corriente, combinación que puede deberse a la pasivación del recubrimiento.

Figura53. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en H2O

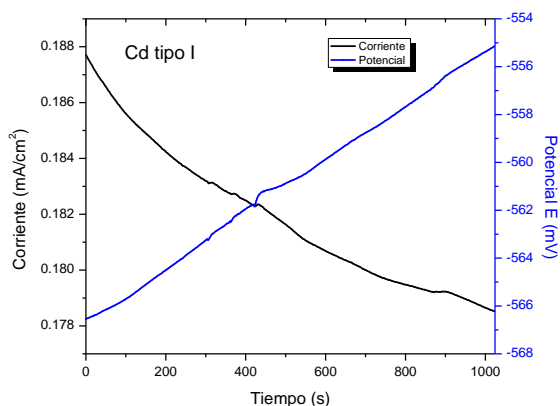
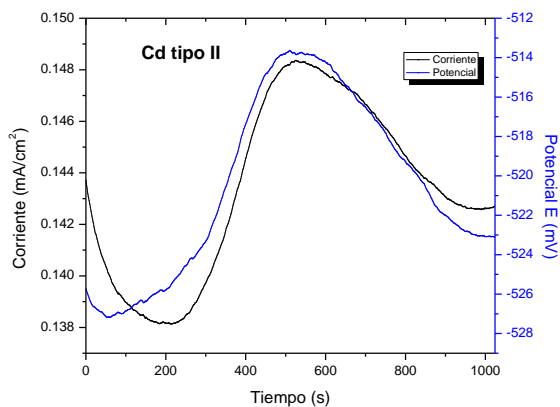


Figura54. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en H2O

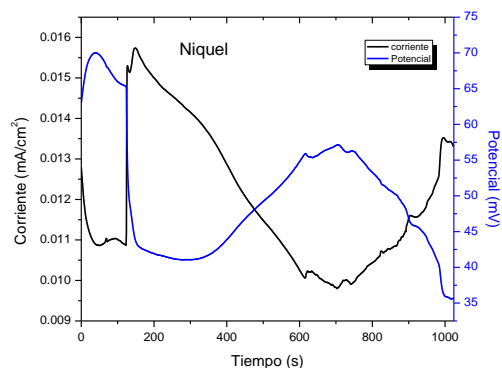


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura54, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las series de tiempo para el recubrimiento Cd Tipo II. Allí, fue posible distinguir un comportamiento diferente al presentado para Cd Tipo I y Cr. Desde el inicio de la exposición hasta aproximadamente 100 s hubo una disminución del potencial y la corriente fue presente, en este punto, un alto drenaje de corriente se presentó y un ennoblecimiento del potencial hasta cerca de los 600 s. Posteriormente, se presentó una disminución del potencial (más activo) acompañado de una

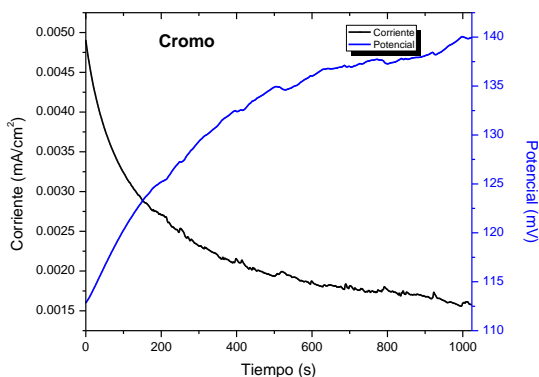
disminución de la corriente. El comportamiento de la serie de tiempo para Ni en H₂O (Figura55) fue similar al presentado por Cd Tipo II, sin embargo, la corriente y el potencial se comportan inversamente. El constante cambio de la corriente y el potencial podría deberse a la inestabilidad del recubrimiento y al poco tiempo de exposición.

Figura55. Series de tiempo de potencial y corriente para Ni en H₂O



Fuente: Elaboración propia.

Figura56. Series de tiempo de potencial y corriente para Cr en H₂O



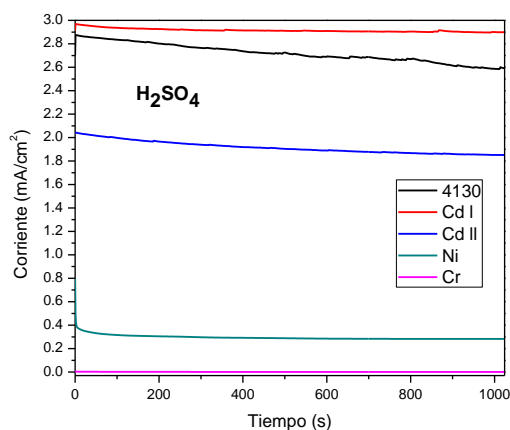
Fuente: Elaboración propia.

Ruido Electroquímico en H₂SO₄

En la Figura57 y Figura58 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la influencia de H₂SO₄ en los diferentes sistemas en series de tiempo de corriente y potencial. Es notable una corriente menor de los recubrimientos Ni y Cr

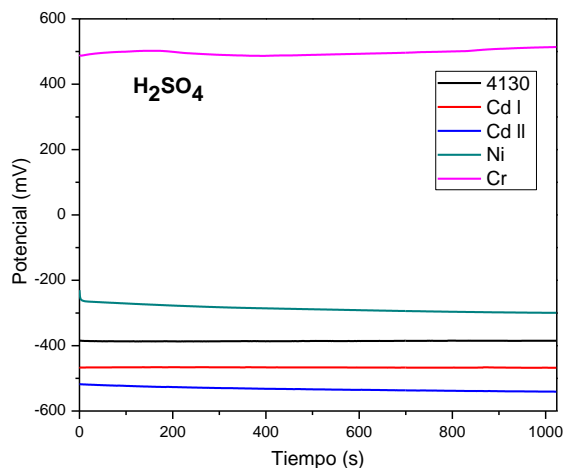
en todo el tiempo de exposición. El Cr presentó un potencial de 489,36mV, más positivo que los demás recubrimientos, lo que puede vincularse con una posible capa protectora sobre la misma superficie. El potencial de recubrimiento del níquel fue el segundo sistema más noble (-267,22mV).

Figura57 Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en H₂SO₄



Fuente: Elaboración propia.

Figura58. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en H₂SO₄

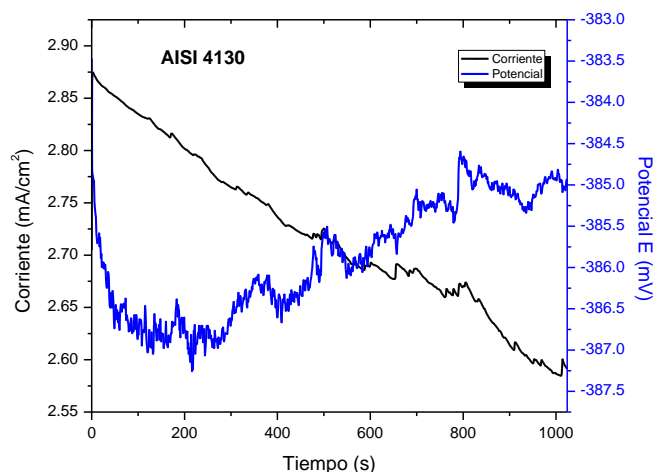


Fuente: Elaboración propia.

La serie de tiempo en corriente y potencial para el acero AISI 4130 en solución de H₂SO₄ se presenta en la Figura59. En esta se observó una disminución de la corriente con un potencial cuasi constante en todo el tiempo de la exposición, sin

embargo, ambas variables (principalmente el potencial) presentan transitorios súbitos que pueden asociarse a la nucleación de sitios localizados de picadura, picaduras metaestables o en algunos casos a corrosión por hendidura o crevice, contemplado también por Escobar¹³⁰. La disminución de la corriente puede indicar una disminución de las velocidades de las reacciones presentes.

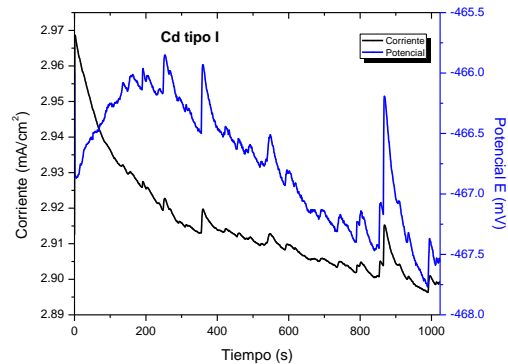
Figura59. Series de tiempo de potencial y corriente para AISI 4130 en H₂SO₄



Se puede identificar claramente que los transitorios en potencial y corriente en Cd Tipo I (Figura60) tienen una baja frecuencia y tiempos de duración altos con intensidades, lo cual es característico de la nucleación de picaduras en medios corrosivos como el H₂SO₄.

Figura60 Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en H₂SO₄

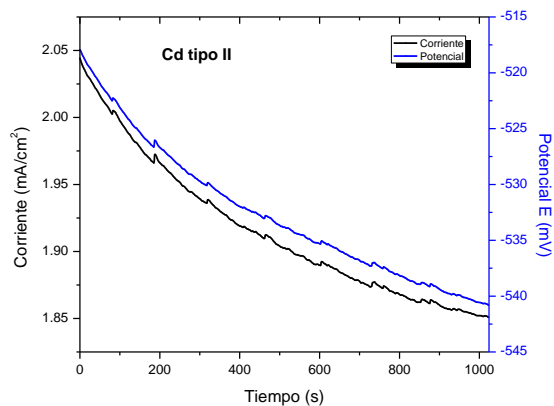
¹³⁰ ESCOBAR, D.; CALDERÓN, J. y MINOTAS, J. Estudio de la corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico. En: Revista ION. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 1998, Volumen 15, Número 1.



Fuente: Elaboración propia.

En la exposición de Cd Tipo II en H₂SO₄ (Figura61) se presentaron tránsitos pequeños en ambas variables, mientras fue presente una disminución de la corriente y una activación del sistema.

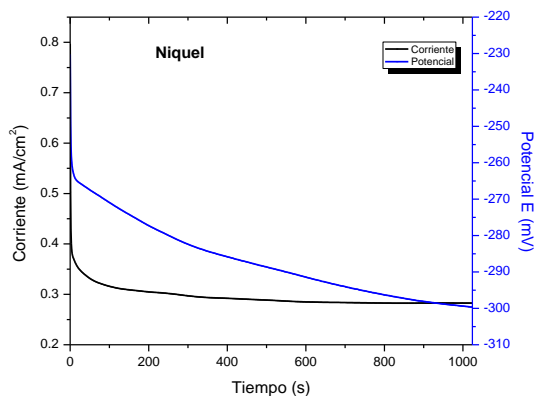
Figura61. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en H₂SO₄



Fuente: Elaboración propia.

En contraposición, los recubrimientos de Ni y Cr no presentaron tránsitos en la respuesta de la corriente y potencial. En el caso del sistema níquel una disminución de ambas variables fue presente en función del tiempo, no obstante, una estabilización para la corriente ocurrió en 0.3 mA/cm², lo que puede relacionarse con la estabilización de reacciones que pudieran haber ocurrido en la superficie. El potencial no presentó una estabilización en ningún valor, lo que puede vincularse con la continua activación del sistema.

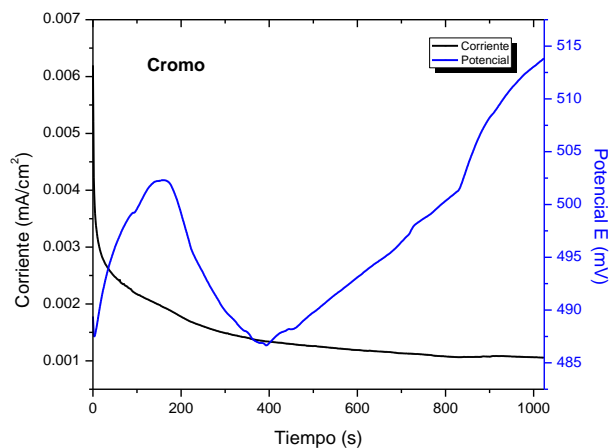
Figura62. Series de tiempo de potencial y corriente para Níquel en H₂SO₄



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la corriente para el recubrimiento de cromo fue similar a la presentada para el níquel, sin embargo, el valor de estabilización fue 0.001 mA/cm^2 . El potencial describe una tendencia a potenciales más nobles, lo que es particular para sistemas con buenas características electroquímicas.

Figura63. Series de tiempo de potencial y corriente para cromo en H_2SO_4



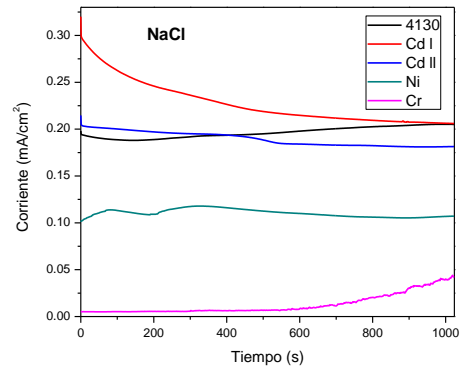
Fuente: Elaboración propia.

Ruido Electroquímico en NaCl

Anteriormente se describió que las densidades de corrientes para los recubrimientos de Ni y Cr en H_2O y H_2SO_4 son inferiores, comparadas con el AISI 4130, Cd I y Cd II. Un comportamiento similar se presentó para los mismos sistemas cuando las pruebas se realizaron en NaCl al 3.5%, como se muestra en las Figura64 y Figura65. Este comportamiento puede deberse a un mejor

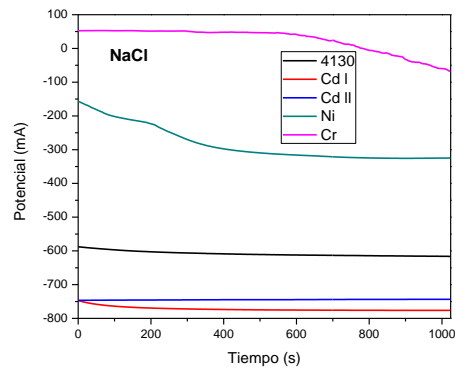
comportamiento electroquímico del Ni y Cr en contraposición a los demás sistemas.

Figura64. Serie tiempo de corriente para todos los sistemas en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

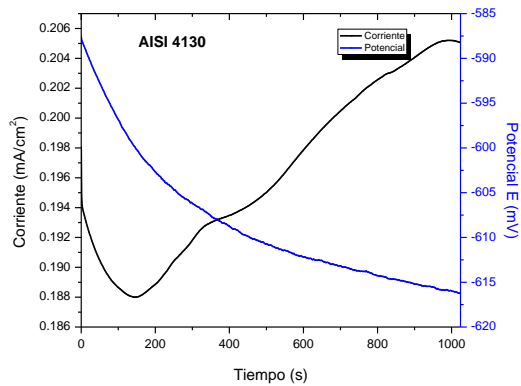
Figura65. Serie tiempo de potencial para todos los sistemas en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

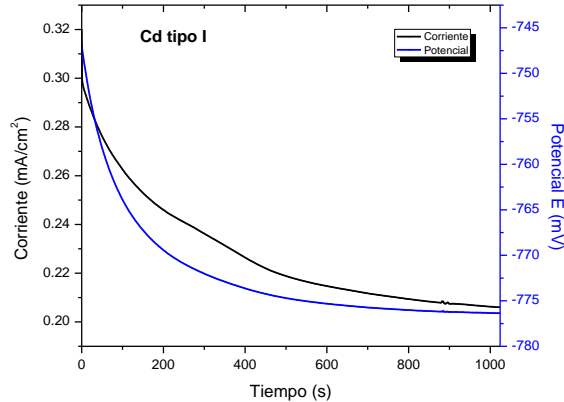
A pesar de la disminución de la corriente en los primeros 170 s, un comportamiento activo fue descrito para el acero AISI 4130 cuando fue sumergido en NaCl.

Figura66. Series de tiempo de potencial y corriente para AISI 4130 en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

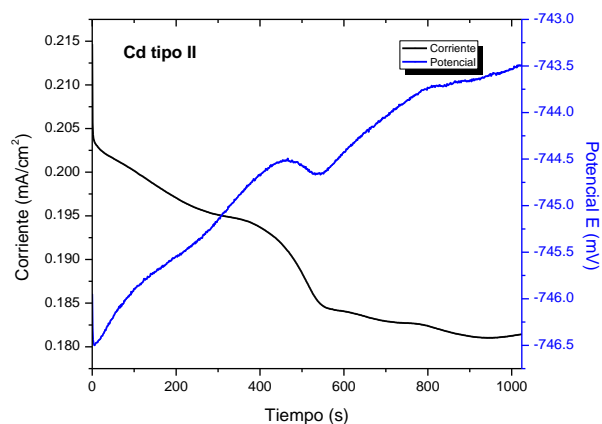
Figura67. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo I en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

Para el recubrimiento Cd Tipo I una disminución de corriente y una leve tendencia a potenciales más activos fue presente (Figura67), caso no ocurrido para el sistema Cd Tipo II, donde una disminución de la corriente y una tendencia a potenciales más nobles (Figura68) fue censado. Este tipo de comportamiento puede relacionarse con un mejor comportamiento electroquímico, debido a una posible capa protectora en la superficie del recubrimiento.

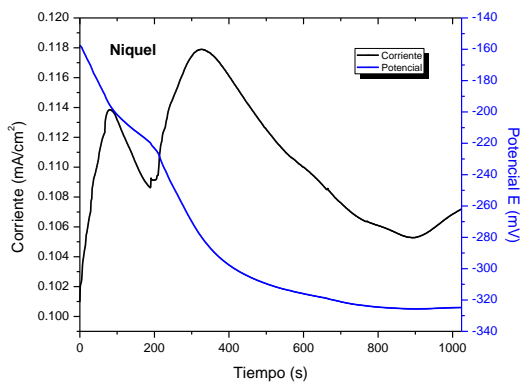
Figura68. Series de tiempo de potencial y corriente para Cd tipo II en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

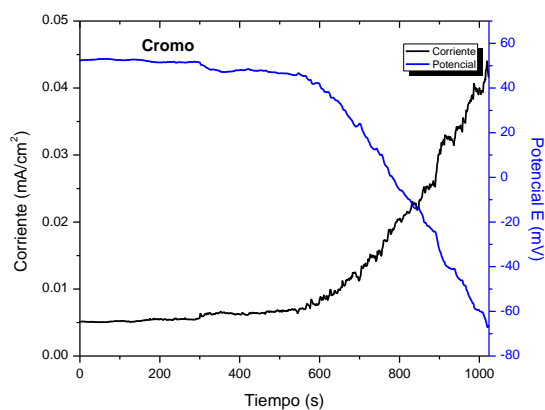
En las Figura69 y Figura70 se presentan las series de potencial y corriente para los recubrimientos en níquel y cromo, respectivamente, cuando son ensayados en NaCl al 3.5%. Para el caso del níquel una pequeña variación de la corriente ocurrió para los primeros datos lo que puede vincularse con la inestabilidad del recubrimiento. Para el cromo una activación electroquímica se presentó, hubo tendencia a potenciales más activos y un aumento de la corriente, lo que puede indicar una inestabilidad del sistema en esta solución.

Figura69. Series de tiempo de potencial y corriente para Ni en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

Figura70. Series de tiempo de potencial y corriente para Cr en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Resistencia a la polarización lineal

Con la prueba RPL se obtuvo el valor de resistencia a la polarización en el rango de ± 30 mV a partir del E_{corr} . Por medio de la extrapolación de las pendientes de Tafel se obtuvieron los valores de R_p , I_{corr} y E_{corr} , así mismo, se relacionó la velocidad de corrosión de cada sistema. En las Tabla 5,

Tabla 6 y Tabla 7 se muestran estos parámetros para H_2O , H_2SO_4 y $NaCl$, respectivamente.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos para H_2O a partir de RPL

SISTEMA	R_p [$\Omega \cdot cm^2$]	I_{corr} [mA/cm ²]	E_{corr} [mV]	V_{corr} [mm/año]
S/R	915,67	0	-724	0,24575
Cd I	1763,8	8631,6101	-767	0,1546686
Cd II	280940	51,7558184	-766	0,0009711
Ni	3590,4	5339,28595	-310	0,075984
Cr	228630	69,5446137	-504	0,0011932

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 6. Parámetros electroquímicos para H₂SO₄ a partir de RPL

SISTEMA	Rp [Ohm*cm ²]	Icorr [mA/cm ²]	Ecorr [mV]	Vcorr [mm/año]
S/R	31,16	543363,9	-486	7,223
Cd I	87,28	203277,8	-767	2,578
Cd II	96,88	110653,1	-763	2,322
Ni	124,25	126384,5	-425	1,810
Cr	303810	0		0,0007407

Fuente: *Elaboración propia.*

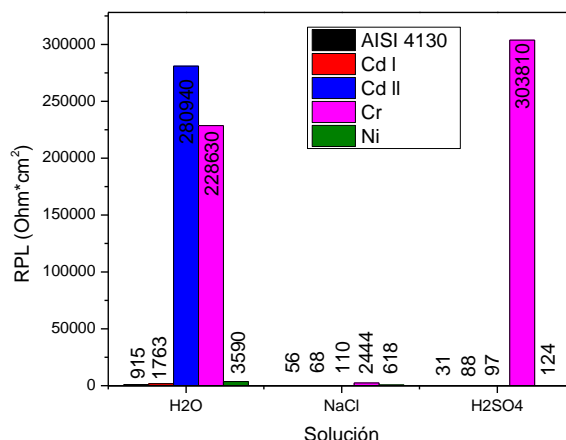
Tabla 7. Parámetros electroquímicos para NaCl a partir de RPL

SISTEMA	Rp [Ohm*cm ²]	Icorr [mA/cm ²]	Ecorr [mV]	Vcorr [mm/año]
S/R	55,841	292718,94	-996	4,0297
Cd I	67,618	215363,86	-856	4,0345
Cd II	109,7	154710,79	-876	2,4868
Ni	618,81	26402,63	-507	0,4408657
Cr	2444	8658,992	-561	0,1116228

Fuente: *Elaboración propia.*

A partir de la Figura 71 se puede relacionar que los sistemas en la solución de H₂O presentaron mayor resistencia al flujo de carga, especialmente, en los sistemas Cd Tipo II y Cr donde el RPL fue del rango 1E5 Ohm*cm², caso contrario en NaCl donde 55,8 Ohm*cm² y 618 Ohm*cm² para el sustrato (S/R) y el Cr, respectivamente, fueron los valores para RPL extremos. Para la H₂SO₄ las resistencias fueron similares que, en NaCl, sin embargo, el recubrimiento con base de Cr ostentó una alta resistencia a la polarización lineal. Es evidente, que el sistema que desempeñó un mejor comportamiento electroquímico en los diferentes sistemas fue el Cr, aunque en NaCl el valor haya sido más bajo que en los demás sistemas.

Figura71. Resistencia a la polarización lineal (RPL) para los diferentes sistemas en H₂O, NaCl y H₂SO₄

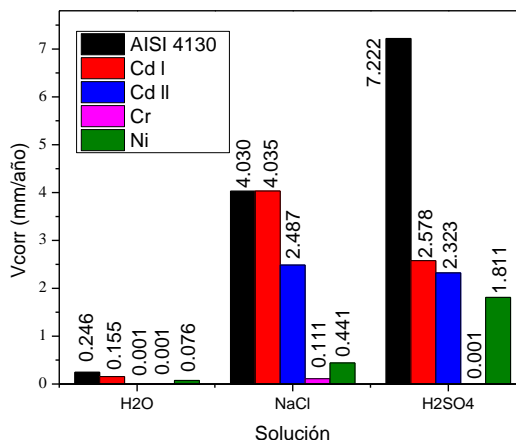


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al análisis de la velocidad de corrosión se realizó un histograma de V_{corr} [mm/año] como se muestra en la Figura72 las velocidades de corrosión para todos los sistemas permiten visualizar un comparativo entre las diferentes velocidades de corrosión en cada medio de exposición para cada una de las muestras evaluadas.

Comparando las velocidades de corrosión en los diferentes sistemas se evidenció que fueron muy similares los comportamientos para cada una de las soluciones de estudio; es decir, una velocidad de corrosión mayor en AISI 4130 que en los recubrimientos a base de Cr y Ni con una velocidad intermedia para Cd Tipo II. En H₂O las velocidades de corrosión de los diferentes sistemas se encuentran en el rango de 1E-2 mm/año y 1E-1 mm/año, menor que en los demás electrolitos. Para NaCl y H₂SO₄ las velocidades de corrosión de los recubrimientos de Cr y Ni presentaron una menor velocidad que el sustrato, Cd Tipo I y Cd Tipo II, lo que puede relacionarse con un mejor comportamiento electroquímico. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos, se evidenció que los medios más agresivos para la superficie de los sistemas fueron NaCl y el H₂SO₄ y, por consiguiente, una velocidad mayor que en H₂O de los distintos sistemas.

Figura72. Velocidades de corrosión para todos los sistemas en H₂O, NaCl y H₂SO₄

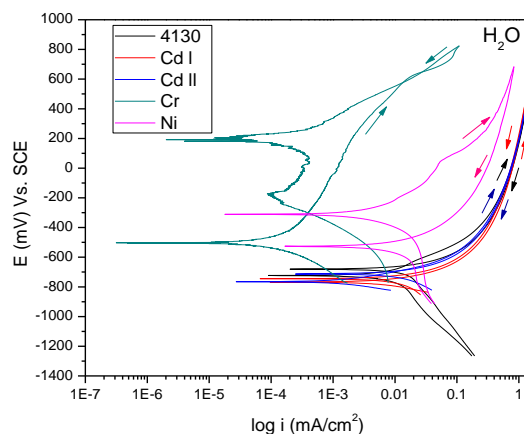


Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Curvas de polarización

Se realizaron mediciones de polarización potenciodinámicas cíclica (CPC), con el fin de evaluar el mecanismo de corrosión de los sistemas de estudio, incluido el sustrato AISI 4130. Las curvas potenciodinámicas cíclicas (Figura73, Figura74 y Figura75) son gráficas del potencial de corrosión frente a logaritmo natural de la densidad de corriente [mA/cm²] y permiten conocer la susceptibilidad del material a corroerse, ya sea de forma localizada o de forma generalizada y otros fenómenos como la pasividad que podría presentarse en el sistema de estudio.

Figura73. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en H₂O

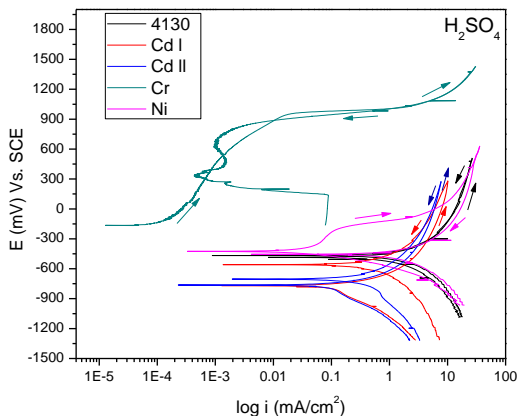


Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas presentadas para AISI 4130, Cd Tipo I y Cd Tipo II tienen un comportamiento similar en todos los medios de estudio. La Figura 73 muestra las curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de AISI 4130 y los diferentes recubrimientos cuando fueron expuestos en H_2O . Una activación mixta en las ramas anódicas y catódicas en todos los sistemas fue presente. A partir del potencial de corrosión es visible un aumento en el logaritmo de la densidad de corriente que puede relacionarse con un fenómeno corrosivo. Sin embargo, es a partir del potencial de regreso que se puede evaluar el mecanismo en el que se presenta este fenómeno. Se ha descrito que a partir de tal potencial la corriente toma una respuesta que revela el mecanismo de corrosión. Durante el retroceso en dicha respuesta se presenta una histéresis positiva o negativa. Al existir una densidad de corriente mayor que en el primer medio ciclo durante el regreso, es una histéresis positiva, dado que regresa por dentro de la curva anódica, y es característica a una corrosión localizada. Caso contrario relacionado a una alta resistencia a la corrosión localizada o a corrosión generalizada presente.

A partir de esto, es posible relacionar al recubrimiento de Ni con una histéresis positiva que se podría interpretar con una alta susceptibilidad a la corrosión localizada cuando fueron expuestas en H_2O . Para los demás sistemas no es claro una histéresis lo que puede vincularse con una alta resistencia a la corrosión localizada. No obstante, los potenciales de corrosión para AISI 4130, Cd Tipo I y Cd Tipo II son más activos, comparado con el Cr y el Ni, lo que puede deberse a una alta susceptibilidad a la corrosión.

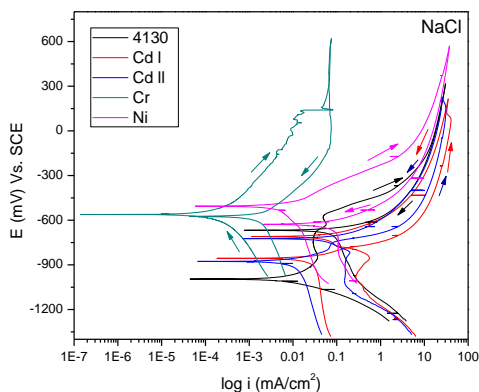
Figura 74. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en H_2SO_4



Fuente: Elaboración propia.

Todos los sistemas expuestos en NaCl (Figura75) presentaron un comportamiento similar que en H_2O , una activación mixta de las ramas anódica y catódica, pese a que el recubrimiento de Cr solo presentó activación anódica, lo que podría estar vinculado una alta actividad de este sistema con el H_2SO_4 al inicio de la exposición. El mecanismo de corrosión para los diferentes sistemas se puede relacionar de la siguiente manera: para AISI 4130, Cd Tipo I y Cd Tipo II una alta resistencia a la corrosión localizada, caso no presentado para recubrimiento a base Ni, el cual presentó alta susceptibilidad a la corrosión localizada de igual manera para el Cr. En NaCl, se pudieron notar susceptibilidades más altas a la corrosión localizada para el sustrato Ni y Cr, ya que se presentaron áreas más amplias en las histéresis positivas. Para los demás sistemas un retorno negativo fue descrito, lo que puede sugerir una alta resistencia a la corrosión localizada.

Figura75. Curvas de polarización potenciodinámicas cíclicas de los diferentes sistemas en NaCl

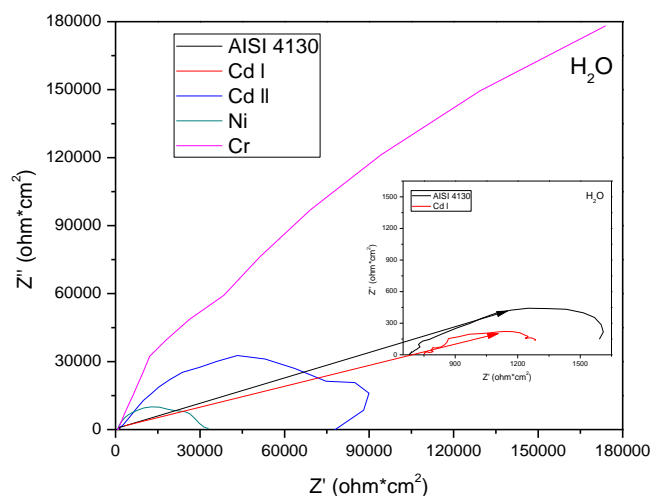


Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Los espectros de impedancia reflejan el comportamiento dieléctrico de un sistema, es decir, reacciones de oxidación-reducción y la transferencia de masa en las interfaces electroquímica (EI). Los diagramas de Nyquist presentan las impedancias reales e imaginarias en los ejes de las abscisas y ordenadas, respectivamente. Comparar los diámetros de los semicírculos en los diferentes diagramas de Nyquist es una manera rápida de evaluar la resistencia a la corrosión.

Figura76. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en H₂O



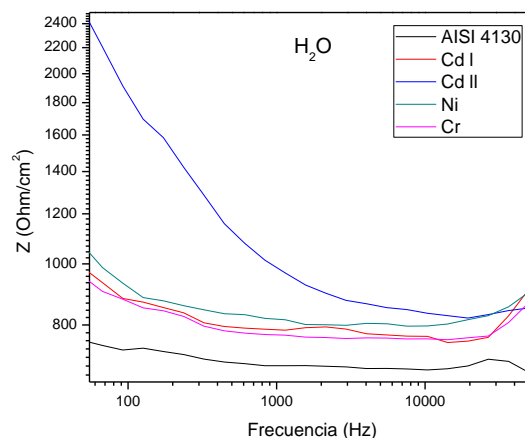
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura76 se muestran los diagramas de Nyquist en las pruebas realizadas en la solución H₂O para el sustrato AISI 4130 y los recubrimientos Cd I, Cd II, Ni y Cr. Se pudo notar una alta susceptibilidad de AISI 4130 y Cd Tipo I a la corrosión, por otro lado, una menor susceptibilidad a la corrosión en Cr, Cd Tipo II y Ni se

presentó, ya que los diámetros de los semicírculos son mayores, respectivamente. Este tipo de comportamiento se puede atribuir a la formación de productos pasivos de corrosión en la superficie del recubrimiento. Además, debido a los altos valores de impedancia para el Cr, el semicírculo presentado por Cr es incompleto.

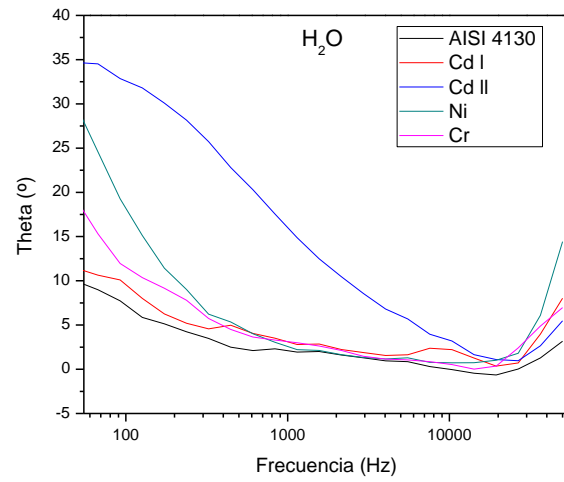
La respuesta de los diagramas de *impedancia absoluta* y *fase* se puede relacionar con el comportamiento electroquímico en los diagramas de Nyquist. Una alta impedancia de los sistemas para bajas frecuencias que disminuye a la medida que aumenta este parámetro y el tiempo de exposición para casi todos los sistemas de estudio. Para el sustrato y los diferentes recubrimientos expuestos en H₂O una alta impedancia absoluta fue presente para el Cd Tipo II con una disminución considerable hasta igualar el valor a al recubrimiento de Cr y Ni, los cuales no presentan una disminución considerable en esta solución (Figura77). Se ha reportado que un alto valor del ángulo en el diagrama de fase es referente a una buena resistencia a la corrosión, un *comportamiento capacitivo*, es decir, la impedancia está en relación con la reactancia del capacitor. La disminución del ángulo se puede corresponder a una alta susceptibilidad a la corrosión a medida que aumenta el tiempo de exposición, caso presente para Cd Tipo II, Ni, Cr donde la disminución del ángulo fue considerable (Figura78).

Figura77. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en H₂O



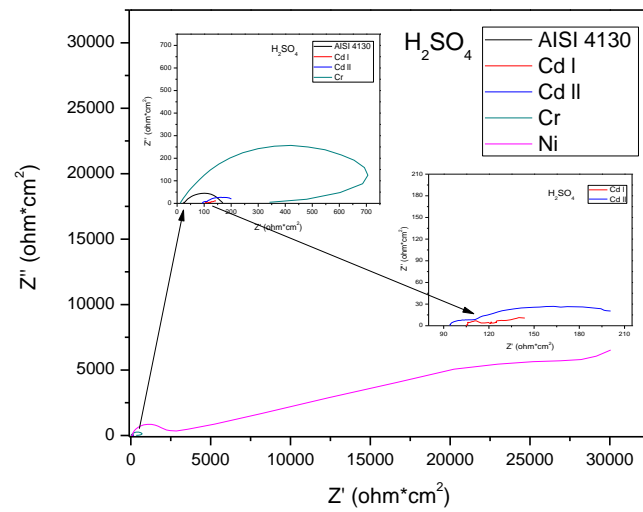
Fuente: Elaboración propia.

Figura78. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en H₂O



Fuente: Elaboración propia.

Figura79. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en H₂SO₄

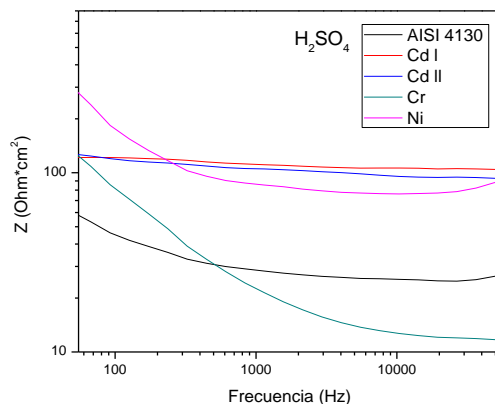


Fuente: Elaboración propia.

Los diagramas de Nyquist para el sustrato AISI 4130 y los diferentes recubrimientos evaluados en la solución con 1% en peso de H_2SO_4 se presentan en la Figura79. En este diagrama fue necesario subdividir la respuesta de las impedancias en tres diagramas debido a la gran impedancia presentada en Ni, en el cual los diámetros de los semicírculos presentados son mayores que para los demás sistemas de estudio. Este tipo de comportamiento puede representar una resistencia a la corrosión mayor que en Cr, AISI 4130, Cd Tipo I y Cd Tipo II, respectivamente.

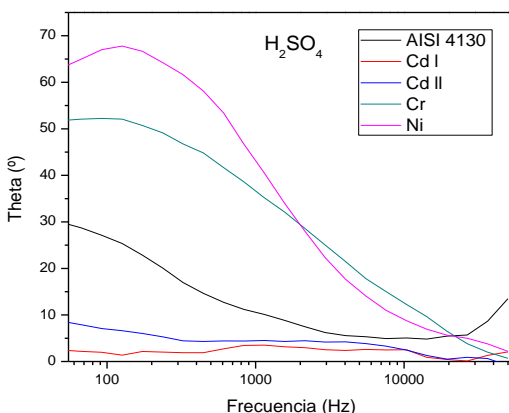
De las respuestas de la impedancia electroquímica en H_2SO_4 fue posible notar dos semicírculos para el Ni, Cd Tipo I y Cd Tipo II, caso que no se presentó en el Cr, este último comportamiento puede corresponder al poco tiempo que estuvo expuesto el recubrimiento a la solución; en efecto, un período corto de inmersión no podría revelar alguna degradación del sustrato en ciertos electrolitos. El punto de inflexión presente en la respuesta de las impedancias para altas frecuencias en Ni, Cd Tipo I y Cd Tipo II puede ser efecto del inicio de la corrosión del material base (AISI 4130), debido a que la solución penetra en el recubrimiento y se pone en contacto en una zona cada vez mayor del sustrato metálico y se inicia la corrosión, y por consiguiente una alta impedancia presente en el diagrama de Nyquist a partir del nuevo semicírculo.

Figura80. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en H_2SO_4



Fuente: Elaboración propia.

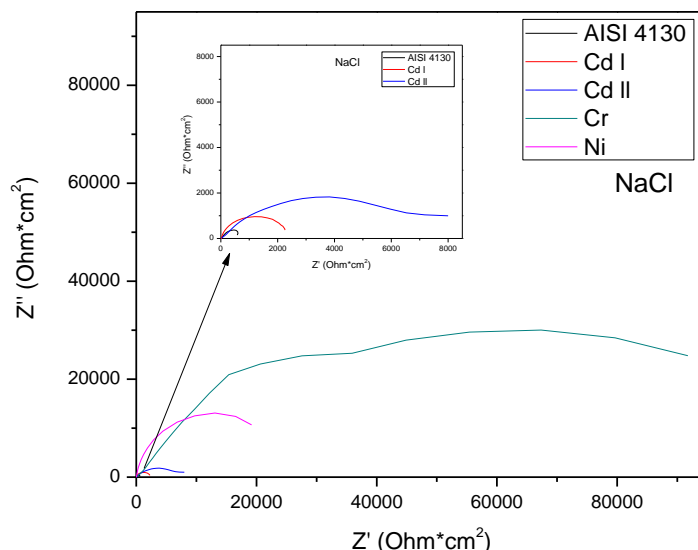
Figura81. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en H_2SO_4



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura80 se describe el comportamiento de la *impedancia absoluta* para todos los sistemas sumergidos en H_2SO_4 . Se notó que no existe un cambio considerable para Cd Tipo I y Cd Tipo II de las impedancias, esto se puede relacionar con los resultados mostrados en el diagrama de Nyquist, donde los semicírculos achatados para estos dos recubrimientos fueron característicos y se pueden asociar a que no existe una alta permeabilidad eléctrica entre las interfases del sistema electrolito-recubrimiento-sustrato que, aunado su bajo valor de impedancia, se puede relacionar con una baja resistencia a la corrosión electroquímica. Este tipo de fenómeno se puede corroborar en el diagrama de fase mostrado en la Figura81, en el cual para Cd Tipo I y Cd Tipo II tienen un comportamiento resistivo para todas las frecuencias. Para Ni, Cr y AISI 4130 se presenta un desarrollo capacitivo, un buen comportamiento a la corrosión para frecuencias bajas, y a medida que pasa el tiempo de exposición una respuesta resistiva va tomando lugar y de esto surge un doble semicírculo para Cr en los diagramas de Nyquist, no obstante, a pesar de que se comprueba corrosión en el sustrato, se presenta un mejor comportamiento a la corrosión en este sistema.

Figura82. Diagramas de Nyquist para el sustrato (AISI 4130) y recubrimientos en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

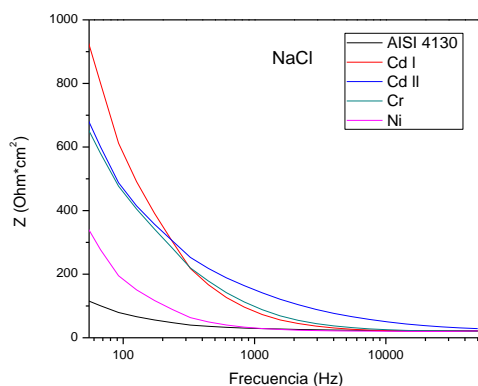
De forma similar en la solución de NaCl (Figura82), los diagramas de Nyquist presentaron semicírculos achatados que son característicos de un comportamiento capacitivo, alta resistencia a la corrosión. En esta solución fue visible un mejor comportamiento electroquímico en Cr y Ni con respecto a los demás sistemas; no obstante, no se reportó un doble semicírculo para altas frecuencias referente a la degradación del recubrimiento e inicio a la corrosión del sustrato.

Los diagramas de impedancia absoluta y de fase para los sistemas sumergidos en NaCl mostrados en las Figura83 y Figura84, sugieren una alta resistencia a la corrosión en frecuencias altas – poco tiempo de exposición y, posteriormente, un decaimiento de la resistencia a la corrosión. Esto es mayormente visible en el diagrama de fase, en donde el ángulo de fase se sostuvo por un rango de frecuencia más amplio comparado con los demás sistemas, en las demás soluciones.

A modo de discusión, el comportamiento de los sistemas en las pruebas de impedancia electroquímica está asociada de cierta manera con la absorción de solución por los defectos que pueda tener la superficie de estudio y/o de la degradación causada por el sistema corrosivo presente en la superficie. A medida que la solución penetra en el recubrimiento, una zona cada vez mayor del sustrato es alcanzada por el electrolito y entre mayor sea el área es más posible que inicie la corrosión, como es el caso de los sistemas que presentan doble semicírculo. Es por esto, que la resistencia a la corrosión depende del área atacada. Es importante relacionar estos resultados con las secciones transversales de los

recubrimientos. En tal sección del documento se describió que el recubrimiento a base de Ni fue homogéneo, con buena adherencia y pocos defectos (Figura43), esto pudo ser una causa importante del porqué tuvo un mejor comportamiento a la corrosión comparado con el Cd Tipo I (Figura19) y Cd Tipo II (Figura27), los cuales fueron irregulares y presentaron grietas y poros, tal como lo menciona B. O. Oni¹³¹, el aumento de la velocidad de corrosión del acero, en ese caso estañado, se atribuye a la resistencia reducida a la transferencia de carga, debido a la ruptura de la superficie de estaño a altas concentraciones de cloruro, provocando un ataque en ese defecto del recubrimiento.

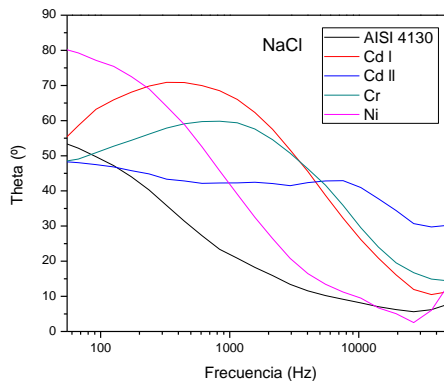
Figura83. Diagrama de Bode de la impedancia absoluta para los sistemas sumergidos en NaCl



Fuente: Elaboración propia.

Figura84. Diagrama de fase para los sistemas sumergidos en NaCl

¹³¹ ONI, B.O.; EGIEBOR, N.O.; EKEKWE, N.J. y CHUKU, A. Corrosion Behavior of Tin-Plated Carbon Steel and Aluminum in NaCl Solutions Using Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. Vol.7 No.4, December 20, 2008. ISSN Online: 2327-4085



Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Microscopia Óptica - Análisis Superficial

Se realizó una visualización de los recubrimientos de Cd Tipo I y II, de cromo y níquel en un estereoscopio antes y después de la aplicación de las pruebas electroquímicas, con el fin de observar la reacción de los ataques corrosivos en la superficie.

Cadmio Tipo I

Condición inicial

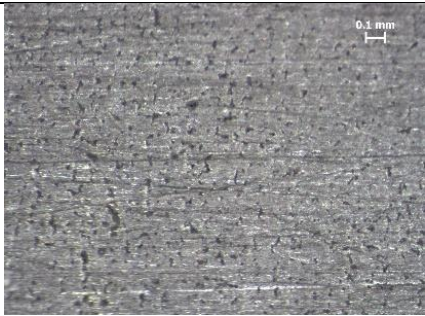
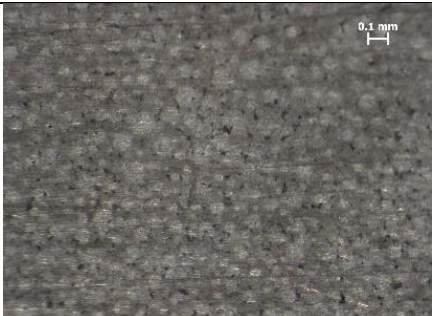
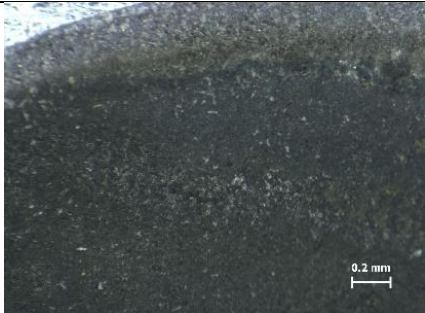

Figura85. Recubrimiento Cadmio Tipo I (Aumento a 20X).



Fuente: Elaboración propia.

Después de Pruebas Electroquímicas

Figura86. Recubrimiento Cadmio Tipo I. Aplicación técnicas electroquímicas en H₂O y NaCl

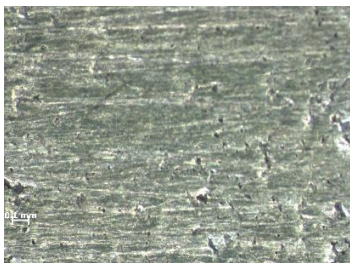
Medio corrosivo: H ₂ O	 <p>Ruido_RPL_CPCP_Aumento a 50X</p>	 <p>Impedancia_Aumento a 50X</p>
Medio corrosivo: NaCl	 <p>Ruido_RPL_CPC_Aumento a 50X</p>	 <p>Impedancia_Aumento a 50X</p>

Fuente: Elaboración propia.

Cadmio Tipo II

Condición inicial

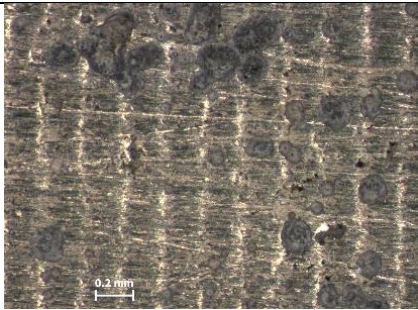
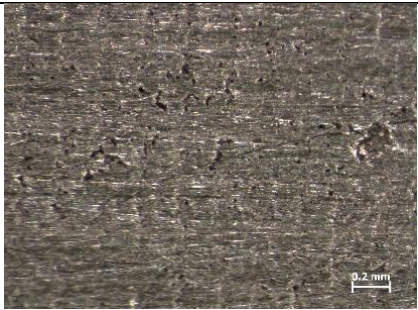
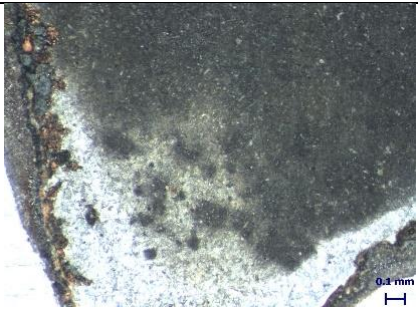
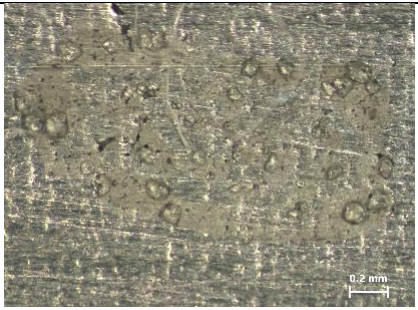
Figura87. Recubrimiento Cadmio Tipo II (Aumento a 50X).



Fuente: Elaboración propia.

Después de pruebas electroquímicas

Figura88. Recubrimiento Cadmio tipo II. Aplicación Técnicas electroquímicas en H2O y NaCl

Medio Corrosivo: H2O	 <p>Ruido_RPL_CPC_Aumento a 50X</p>	 <p>EIS_Aumento a 50X</p>
Medio corrosivo: NaCl	 <p>Ruido_RPL_CPC_Aumento a 50X</p>	 <p>EIS_Aumento a 50X</p>

Fuente: Elaboración propia.

Cromo

Condición inicial

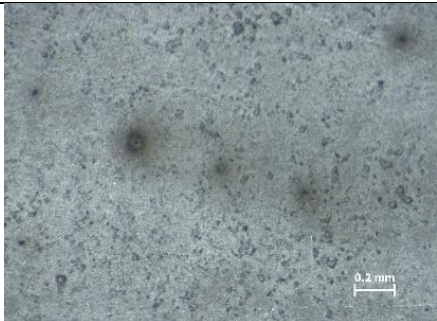

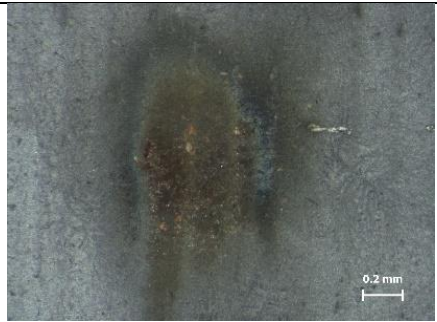
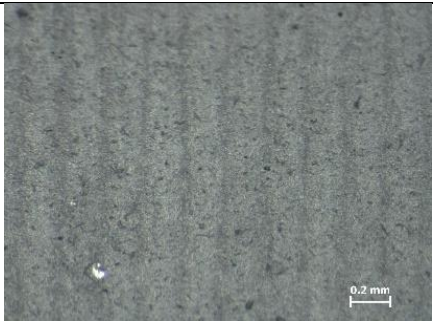
Figura89. Recubrimiento Cromo (Aumento a 50X).



Fuente: Elaboración propia.

Después de Pruebas Electroquímicas

Figura90. Recubrimiento Cromo. Aplicación técnicas electroquímicas en H₂O y NaCl

Medio corrosivo: H ₂ O	 Ruido_RPL_CPC_ Aumento a 50X	 EIS_ Aumento a 50X
Medio corrosivo: NaCl	 Ruido_RPL_CPC_ Aumento a 50X	 EIS_ Aumento a 50X

Fuente: Elaboración propia.

Níquel

Condición inicial

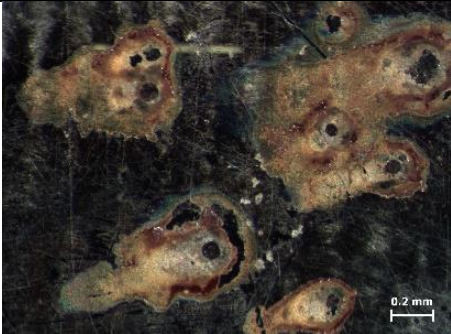
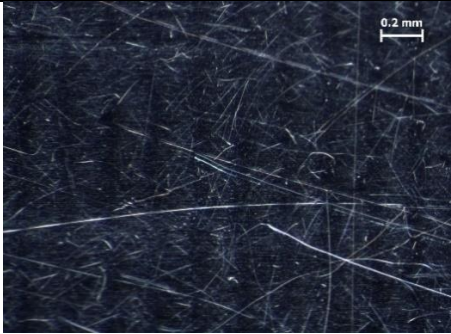

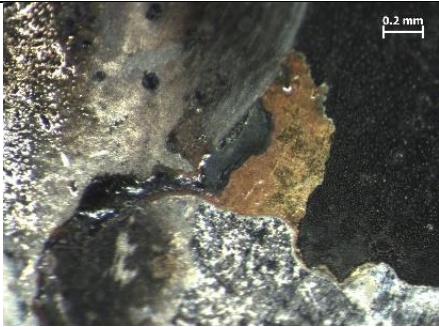
Figura91. Recubrimiento Níquel (Aumento a 20X).



Fuente: Elaboración propia.

Después de Pruebas Electroquímicas

Figura92. Recubrimiento Níquel. Aplicación de técnicas electroquímicas en H₂O y NaCl

Medio corrosivo: H ₂ O		
	Ruido_RPL_CPC_Aumento a 50X	EIS_ Aumento a 50X
Medio corrosivo: NaCl		
	Ruido_RPL_CPC_Aumento a 50X	EIS_ Aumento a 50X

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Comparación de la velocidad de corrosión, mecanismos de reacción, relación entre la interface electrodo y electrolito, así como las características microestructurales, de los recubrimientos base Cd(I-II), Cr y Ni.

Características microestructurales y electroquímicas de los recubrimientos

A continuación, se resumen las características microestructurales y electroquímicas de los recubrimientos Cd, Cr y Ni. Fue posible generar características en cuanto a la morfología de la microestructura como la irregularidad del recubrimiento, identificación de grietas, adherencia, poros y grosor de estos. Los recubrimientos de Cd fueron caracterizados por irregularidad de la superficie, una alta densidad de poros, una superficie no uniforme y una falta de adherencia sobre el sustrato AISI 4130. Recubrimientos compactos (sin

porosidades) con una adherencia continua sobre el sustrato y sin grietas fueron relacionados para el Cr y Ni.

Tabla 8. Resumen de características microestructurales y electroquímicas para los recubrimientos Cd, Cr y Ni.

	TÉCNICA	CADMIO I	CADMIO II	CROMO	NÍQUEL
Morfología de la microestructura	SEM <i>Análisis transversal y superficial</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Irregular* - Alta densidad de poros - Superficialmente no uniforme - Microgrietas - No adherencia - 15 µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Irregular* - Alta densidad de poros - Superficialmente no uniforme - Grietas pronunciadas - No adherencia - 15 µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Compacto - Buena adherencia - Superficialmente no uniforme - 1 Grieta - 13.5 µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Homogéneo - Compacto - Uniforme - Buena adherencia - No grietas - 36 µm
Corrosión	RPL <i>Velocidad de corrosión**</i>	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Alta - NaCl: Alta - H₂SO₄: Alta 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Baja - NaCl: Alta - H₂SO₄: Alta 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Baja - NaCl: Baja - H₂SO₄: Baja 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Baja - NaCl: Baja - H₂SO₄: Moderada
	RE <i>ST: Sin Tránsitorios CT: Con Tránsitorios E: Estable I: Inestable</i>	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Activo/ST/E - NaCl: Activo/ST/E - H₂SO₄: Activo/CT/E 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Activo/ST/I - NaCl: Activo/ST/E - H₂SO₄: Activo / ST / E - 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Pasivo/ST/E - NaCl: Pasivo/CT/E - H₂SO₄: Pasivo/ST/I 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: Pasivo/ST/I - NaCl: Pasivo/ST/I - H₂SO₄: Pasivo/ST/E
	TÉCNICA	CADMIO I	CADMIO II	CROMO	NÍQUEL
Corrosión	CPC <i>Mecanismo de corrosión ARCL: Alta resistencia corrosión localizada BRCL: Baja resistencia corrosión localizada</i>	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: ARCL - NaCl: ARCL - H₂SO₄: ARCL - <u>E: más activas</u> - <u>Log i: mayores</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: ARCL - NaCl: ARCL - H₂SO₄: ARCL - <u>E: más activas</u> - <u>Log i: mayores</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: ARCL - NaCl: BRCL - H₂SO₄: ARCL - <u>E: más nobles</u> - <u>Log i: menores</u> 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: BRCL - NaCl: BRCL - H₂SO₄: BRCL - <u>E: más nobles</u> - <u>Log i: menores</u>
	IES <i>Susceptibilidad a la corrosión ASC: Alta susceptibilidad corrosión MSC: Moderada susceptibilidad corrosión BSC: Baja susceptibilidad corrosión CIRS: Corrosión interfaz recubrimiento sustrato SCIRS: Sin Corrosión interfaz recubrimiento sustrato</i>	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: ASC - NaCl: ASC/SCIRS - H₂SO₄: ASC/CIRS 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: MSC/SCIRS - NaCl: ASC/SCIRS - H₂SO₄: ASC/CIRS 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: BSC/SCIRS - NaCl: BSC/CIRS - H₂SO₄: MSC/SCIRS 	<ul style="list-style-type: none"> - H₂O: ASC/SCIRS - NaCl: MSC/SCIRS - H₂SO₄: MSC/CIRS

*Colores: rojo, características no deseadas, azul, características intermedias, verde, mejores características en los resultados.

** Velocidades de corrosión comparadas entre los mismos recubrimientos: *alto*, velocidad de corrosión mayor de los sistemas en cada solución; *bajo*, velocidades bajas de los sistemas en cada solución.

En cuanto a las características electroquímicas fueron discriminadas por técnica para evaluar la velocidad de corrosión en los recubrimientos, mecanismo de corrosión y susceptibilidad a la corrosión. Por medio de resistencia a la polarización lineal *RPL* se encontró una relación para la velocidad de la corrosión, a saber: una velocidad de corrosión *alta* para Cd y en general una *baja* velocidad para Cr y Ni.

El hecho que Cr y Ni presenten una baja resistencia a la corrosión localizada obtenida a partir de curvas de polarización cíclicas *CPC* puede deberse a la alta reactividad de NaCl y H₂SO₄, no obstante, estos sistemas tuvieron un potencial de corrosión más pasivo y una corriente de corrosión menor que los recubrimientos de Cd. La susceptibilidad de corrosión también se midió por impedancia electroquímica *IES* allí se relacionó una alta y moderada susceptibilidad a la corrosión para Cd con presencia de corrosión en la interfaz recubrimiento-sustrato, en contraposición para los recubrimientos de Cr y Ni donde existió una mayor impedancia electroquímica.

Bajo el resumen de la Tabla 8, los recubrimientos de Cr y Ni podrían desempeñar una mejor protección del sustrato en condiciones de servicio, debido a su mejor distribución sobre el sustrato, en comparación con los recubrimientos de Cd. También, es plausible en términos de la velocidad de corrosión considerar estos últimos recubrimientos en el reemplazo de los convencionalmente propuestos a base de Cd, dado que la degradación del Cr y Ni en el sistema de recubrimiento-sustrato en H₂O, NaCl y H₂SO₄ tienen un orden y dos órdenes de magnitud menor que los de Cadmio en las diferentes soluciones. Aunado a esto, los recubrimientos de Cr y Ni tienen un potencial de corrosión más pasivo y una corriente de corrosión menor y por lo tanto una menor susceptibilidad a la corrosión que los recubrimientos de Cd, lo que los hace unos candidatos destacados para el reemplazo de los recubrimientos actualmente aplicados.

5. CONCLUSIONES

1. En el análisis metalográfico se pudo observar la interfase entre el recubrimiento y el sustrato. En el caso del Cadmio hubo una separación pequeña y presenta algunas fisuras, sin embargo, en la prueba de Curvas de Polarización no influyó para la generación de una susceptibilidad a corrosión localizada. A diferencia del Níquel, que, aunque en el análisis metalográfico no hay poros y fisuras en la prueba de Curvas de Polarización que mostro una baja resistencia a este tipo de corrosión localizada.
2. En la prueba de ruido electroquímico, el Cadmio presenta un continuo decrecimiento de la corriente respondiendo a la generación de una capa protectora. Por el contrario, el recubrimiento de Níquel presenta inestabilidad constante en H_2O y $NaCl$. Cabe anotar que en los recubrimientos de Cadmio I – II y Cromo presentaron pequeños saltos en la corriente podrían estar asociados a los defectos o irregularidades identificadas en la Microscopia Electrónica de Barrido.
3. Se observó que las grietas y fisuras detectadas en los recubrimientos a través de la Microscopia electrónica de barrido influyeron en la susceptibilidad a la corrosión localizada, dado que en las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica se presentaron dos semicírculos, posiblemente el punto de inflexión sería el inicio de la corrosión del sustrato ya que podría responder a la filtración del electrolito.
4. A partir del análisis por microscopia óptica, se observó que, en los tres medios corrosivos, el recubrimiento de níquel presenta una baja resistencia a la corrosión localizada, lo cual hace que sea descartado como recubrimiento único sobre el sustrato.

6. RECOMENDACIONES

Con el objetivo de continuar la verificación de la posible postulación de estos recubrimientos de Cromo y Níquel para componentes aeronáuticos expuestos a ambientes salinos, se sugiere realizar recubrimientos combinados, con una primera capa de níquel y una capa principal de cromo, de tal forma que la adherencia al sustrato acero AISI 4130 sea óptima y la capacidad protectora del cromo evite una corrosión acelerada.

Realizar pruebas de adherencia para evaluar los recubrimientos con el fin de mitigar un factor de riesgo que contribuya a la aceleración del proceso de corrosión.

Se sugiere revisar los procedimientos de inspección para la detección temprana de posibles puntos de corrosión localizada, teniendo en cuenta que el medio corrosivo es similar al NaCl, con partículas adicionales como arena y otros sólidos transportados por el viento

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, Ana Carolina; WERNEK, Alixandro; CORDEIRO, Ariela; FERREIRA, Eduardo; DAS GRACAS, Fernanda; DE OLIVEIRA, Israel; DE ARAUJO, Jonathan; VIANELLO, Juliano Melquiades; BARBIERI, Marcos; DE OLIVEIRA, Patricia & BRUSTOLIN, Vitelio. Mapeamento Da Base Industrial De Defesa. Brasilia: Agencia Brasileira de Desenvolvimento Industrial ABDI, Instituto de Pesquisa Economica Aplicada IPEA. 2016, p. 400.

ASAMBLEA NACIONAL CONSTITUYENTE. Constitución Política de Colombia: Capítulo VII De la Fuerza Pública. Bogotá D.C.: Asamblea Nacional Constituyente, 1991, p. 74.

ASTM International. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. En: Designation: G 1-90. US: ASTM International. 1999. p. 1-7

ASTM International. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. En: Designation: G 3-89. US: ASTM International. 1999. p. 1-10

ASTM International. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. En: Designation: G 5-94. US: ASTM International. 1999. p. 1-12

ASTM International. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. En: Designation: G 59-97. US: ASTM International. 1997. p. 1-3

ASTM International. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. En: Designation: G 102-89. US: ASTM International. 1994. p. 416-422

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. 1999, ASTM G59 - 97(2014). DOI: 10.1520/G0059-97R14.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. US: ASTM G1-90. 1999.

BÁEZ P., Sandro; TRISTANCHO R., J. L., PEÑA B., D. Y., VÁZQUEZ Q., C. y ANAYA P., H. A. La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) aplicada al estudio del mecanismo de la corrosión en caliente por sales fundidas. En: Dyna.

Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2004, Volumen 71. Número 144. pp. 39-47. ISSN 0012-7353.

BALDWIN, K. R. & SMITH, C. J. E. Advances in Replacements for Cadmium Plating in Aerospace Applications, En: Transactions of the IMF. The International Journal of Surface Engineering and Coatings. UK: Taillor & Francis online, 1996, Volumen 74, No. 6, pp. 202-209.

BILURBINA ALTER, L. y LIESA MESTRA, F. Corrosión y Protección (Primera Ed.). Barcelona: Editor Universidad Politécnica de Cataluña, 2003. p 77.

BROOMAN, E.W. Corrosion performance of environmentally acceptable alternatives to cadmium and chromium coatings: Chromium—Part II. En: Metal Finishing. US: Elsevier USA. 2000, Volume 98, Issue 8, pp. 39-45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(00\)82740-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(00)82740-3).

BRUCE-MACKAY. Nausha Askar. La corrosión: la lucha más extensa. En: Oifield Review, 2016, Vol. 28, No. 2, p. 36-51

CAMACHO PUEBLA, Ana Laura. Technological viewpoints: historical technology, materials and conservation: sem and microanalysis. En: intervención. México D.F.: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía. 2013, vol.4, no.8, pp. 74.

CARDILLI, Emanuele. Aluminium-based Coatings for Cadmium Replacement. Cranfield. 2008. p. 17. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencias Aplicadas). Cranfield University, School of Applied Sciences.

CASTAÑEDA, I.; ROMERO, M.; MALO, J.M. y URUCHURTU, J. Ruido electroquímico de la erosión – corrosión en cobre: su relación con los parámetros hidrodinámicos. En: Revista Metalúrgica. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2010, Volumen 46, Número 5, pp. 446-457.

CHARNG, T., & LANSING, F. Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility (Reporte). United States. 1982. p. 42-69

CICEK, Volcan. Factors influecing corrosion. En: Corrosion Engineering. US: John Wiley & Sons. 2014. p. 25-33

CICEK, Volcan. Types of corrosion. En: Corrosion Engineering. US: John Wiley & Sons. 2014. p. 43-81

CICEK, Volcan. Corrosion Prevention and Protection. En: Corrosion Engineering. US: John Wiley & Sons. 2014. p. 101-168

COTTIS, R. & TURGOOSE, (Nombres). Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy. En: NACE International. Houston: National Association of Corrosion Engineers. 1999.

DAVIS, J.R. (Ed.). The effects and economic impact of corrosion. En: Corrosion: Understanding the basics. US: ASTM International. 2000. p. 1-20

DIAZ BARRIGA CASTRO, Enrique. Síntesis y caracterización de nanoalambres con composiciones y propiedades microestructurales y magnéticas diseñadas. Monterrey, México. 2014. p. 12. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencias en Ingeniería Física Industrial). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. División de estudios de posgrado.

CESSNA. (s.f.). Technical Manual T.O. 4S2-27-13.

CHALAFTRIS, G. Evaluation of aluminium-based coatings for cadmium replacement. UK: Cranfield University, 2003.

DELGADO, et al. El uso del microscopio electrónico de barrido como técnica básica en el estudio de los peloides. En: MARAVER, Francisco; VELA, Lorena y ANKLI, Walter J. IV Congreso Iberoamericano de Peloides IV CIBAP BOÍ 2015. Madrid: Secretaría Técnica Fase 20. 2015, pp. 217-227.

DEPARTMENT OF DEFENSE, EU. MIL-DTL-83488D Detail specification coating, aluminium high purity. EU: Department of Defense. 1999. MIL-DTL-83488D.

DEV CHIDAMBARAM, CLAYTON, Clive R. & DORFMAN, Mitchell R. Evaluation of the electrochemical behavior of HVOF-sprayed alloy coatings. En: Surface and Coatings Technology. Netherlands: Elsevier Ltd. 2004, Volume 176, pp. 307-317. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00809-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00809-0).

DIAZ, I., et al. Some Clarifications Regarding Literature on Atmospheric Corrosion of Weathering Steels. En: International Journal of Corrosion and Scael Inhibition. Russian Federation: Russian Association of Corrosion Engineers. 2012, Volumen 2012, pp. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/812192>.

EFIRD, K.D. Controlling flow effects on corrosion. En: Uhlig's corrosion handbook (3ª Edición). US: John Wiley & Sons, Inc. 2011. p. 903-905

ELAYAPERUMAL, K. & RAJA, V. S. Forms of Corrosion. En: Corrosion Failures: Theory, Case Studies, and Solutions. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2015. DOI:10.1002/9781119043270.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Risk and Technology Review for National Emission Standards for Aerospace Manufacturing and Rework Facilities. (Ciudad/País). 2017. EPA-HQ-OAR-2014-0830.

EVGENIJ BARSOUKOV, J. & ROSS MACDONALD, (Nombres). Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. Second Edition. New York: John Wiley & Sons. 2005.

ESCOBAR, D.; CALDERÓN, J. y MINOTAS, J. Estudio de la corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico. En: Revista ION. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 1998, Volumen 15, Número 1.

FERREIRA, Marcos José Barbieri. Dinamica da inovação e mudanças estruturais: um estudo de caso da industria aeronautica mundial e a inserção brasileira. Brasília. 2009. 257 p. Trabalho de investigação (Doctorado Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas). Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia.

FLINN, Richard A. & TROJAN, Púl K. Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1993, p. 134.

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. Mas allá de la Herrumbe. Segunda reimpresión. Ciudad de México. Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA). 1996.

FUERZA AÉREA COLOMBIANA. Objetivos institucionales y líneas de acción estratégicas. En: Plan Estratégico Institucional 2011-2030. Bogotá D.C.: Exprecard's C.I. S.A.S., 2010, p. 50.

FUERZA AÉREA COLOMBIANA. (2011). Manual de Mantenimiento. Bogotá.

FUERZA AÉREA COLOMBIANA. Mensaje técnico: Mejoramiento al programa de prevención y control corrosión en aeronaves FAC. Bogotá: Fuerza Aérea Colombiana, 2018. MT 914 Rev 5.

GABRIELLI, C.; HUET, F. y KEDDAM, M. Investigation of Metallic Corrosion by Electrochemical Noise Techniques. En: FERREIRA, M.G.S. y MELENDRES, C.A. (Eds). Electrochemical and Optical Techniques for the Study and Monitoring of Metallic Corrosion. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1991. vol 203.

GAONA, Tiburcio, et al. Corrosión en la Industria Aeroespacial. En: VALDEZ SALAS, B, & SCHORR WIENER, M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience, 2013, pp. 33-48.

GARCÍA MARTÍNEZ, María. Desarrollo de recubrimientos base aluminio mediante MOCVD para protección frente a la corrosión y a la oxidación. Madrid. 2013. p. 12. Trabajo de investigación (Doctorado en Materiales). Universidad Complutense de Madrid. Facultad De Ciencias Químicas.

Gómez, F. d. (2017). Tren de Aterrizaje Aeronave A-37B. Malambo, Atlántico.

Gutierrez, Y. (2016). Recubrimientos metálicos. (A. Gómez, Entrevistador)

GEORGE F. Hays. Now is the time. World corrosion organization- publications. {En línea}. {03-11-2019}. Disponible en: http://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications/_/nowisthetime.pdf.

GÓMEZ DE LEÓN HIJES, Félix Cesáreo y ALCARAZ LORENTE, Diego José. Manual básico de corrosión para ingenieros. Murcia: Universidad de Murcia. 2004.

GÓMEZ-GARCÍA, J., et al. Análisis de la degradación de recubrimientos de barrera térmica por espectroscopía de impedancia electroquímica. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Madrid: Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2007, Volumen 46. Número 5, pp. 232-239.

HEFNAWY, A., ELKHOSHKHANY, N. & ESSAM, A. Ni – TiN and Ni-Co-TiN composite coatings for corrosion protection: Fabrication and electrochemical characterization. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2018, Volumen: 735, pp. 600-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.169>

HENAO, Johnny; GÓMEZ, Maryory y CALDERÓN, Jorge. Evaluación de las Propiedades de Recubrimientos de Níquel Electrodepositados. En: Revista Colombiana de Materiales. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2011, Número 1, p. 2.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la Investigación. 6ª Edición. México. McGraw – Hill. 2014.

HILLIER, E.M.K. & ROBINSON, M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc–cobalt alloys. En: Corrosion Science. UK: Elsevier Ltd. 2004, Volume 46, pp. 715-727. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00180-X).

IPOHORSKI, Miguel y BOZZANO, Patricia B. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. En: Ciencia e Investigación. Argentina: Asociación argentina para el progreso de las ciencias. 2013, Tomo 63, Número 3, pp. 43-53.

IBÁÑEZ LLANO, Ana. Estudio de las propiedades mecánicas de recubrimientos obtenidos mediante electrodeposición. Madrid. 2004. Trabajo de investigación (Doctorado en Física). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Departamento de Física Aplicada.

IMAZ MOLINA, Naroa. Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para obtención de recubrimientos metálicos. Barcelona. 2013.

p. 8. Trabajo de investigación (Doctorado en Electroquímica, ciencia y tecnología). Universidad de Barcelona. Departamento de Química-Física. Faculta de Química.

JING WEN, et al. Effect of pase composition and microstructure on the corrosión resistance of Ni-Al intermetallic compounds. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2017, Vol: 695, pp. 2424-2433.

JIMÉNEZ COBOS, Luis German. Recubrimientos metálicos de cobre, cromo y níquel en piezas ferrosas mediante el proceso electrolítico. Quito, Ecuador. 2017. p. 30. Trabajo de investigación (Tecnólogo Superior en Electromecánica). Universidad Central del Ecuador. Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación.

JONNES, Denny A. Principles and prevention of corrosión. Second Edition. Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada. Reno: Prentice-hall.inc, 1996.

JULVE SALVADO, Enrique. Perspectiva general del cromado industrial: características físicas del recubrimiento y tipos de cromado. En: Anales de la Real Sociedad Española de Química. España: Real Sociedad Española de Química. 2001, No. 3, pp. 19-27.

KOMOROWSKI, J.P., et al. Quantification of corrosion in aircraft structures with double pass retroreflection. En: Canadian Aeronautics and space jorunal. Canadá: Vol 42. No.2. June, 1996. pp. 76-82.

LAGUNA GALLEGOS, José María. Microscopia electrónica. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. Laboratorio de Microscopia Electrónica. 2015.

LAWS, Edward A. Aquatic pollution. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1981.

LAWS, Edward A. Aquatic pollution: An Introductory text. 4ta Edición. New York: Editor John Wiley & Sons, Inc. 2017.

MALO TAMAYO, J.M. y URUCHURTU, J. La técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión. México: Instituto de investigaciones eléctricas. 1997, pp. 1-22.

MORENO LEMOS, Abelardo. Programa de envejecimiento aeronaves FAC. 2000. {En línea}. {26-11-2019}. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281902343_Programa_envejecimiento_aeronaves_FAC

MAHMUD, Z.; TÚLIO, P.; AREAS, P. y MÍGNOLO, N. Caracterización estructural de recubrimientos de aleación de Zn-Ni con partículas de CSI o de Al₂O₃

obtenidos por electrodeposición. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2016, p. 2.

SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN (SCAI). Microscopía Electrónica de Barrido. Málaga: Universidad de Málaga. {En línea}. {26-03-2020}. Disponible en: <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>.

MARÍN VILLAR, Camilo. Recubrimientos duros: deposición física en fase vapor PVD. En: Metal actual. 2018, pp. 32-37

MARTÍNEZ, Dora; PÉREZ, Alberto y VELASCO, Abraham. Desgaste en recubrimientos duros en el transporte neumático de hierro de reducción directa. En: Ciencia UANL. México: Universidad Autónoma de Nuevo León. 2004, Volumen 7, Número 2, p. 178.

MATSUSHIMA, I. Localized corrosion of iron and steel. En: Uhlig's corrosion handbook (3ª Edición). US: John Wiley & Sons, Inc. 2011. p. 615-619

MOSSER, Mark F. Metallic – Ceramic Coatings as Replacements for Cadmium Plating. En: SAE Technical paper 900968. Airframe finishing, Maintenance and Repair Conference and Exposition. US: SAE, 1990. DOI: <https://doi.org/10.4271/900968>.

MUÑOZ, Miguel Angel. Manual de vuelo. {En línea}. {Fecha de consulta}. Disponible en: <http://www.pasionporvolar.com/miguel-aengel-munoz-manual-de-vuelo/>

NELSON, M.J. & GROSHART, E.C. Cadmium plating replacements. En: Aerospace Environmental Technical Conference. Huntsville, Alabama: Aerospace Environmental Technical Conference, 1994, pp. 277–284.

OLMOS, Dania, & BENITO GONZÁLEZ, Francisco Javier. Microscopía de Fuerza Atómica. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2008.

OSUNA, F. P. (2005). Fuentes de metales en la zona costera marina. En J. R.-B.-H. Federico Páez Osuna. FA.V. Botello, Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental (págs. 329-343). México, México.

ONI, B.O.; EGIEBOR, N.O.; EKEKWE, N.J. y CHUKU, A. Corrosion Behavior of Tin-Plated Carbon Steel and Aluminum in NaCl Solutions Using Electrochemical Impedance Spectroscopy. En: Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. Vol.7 No.4, December 20, 2008. ISSN Online: 2327-4085

PÁEZ OSUNA, Federico. Fuentes de metales en la zona costera marina. En: BOTELLO, Alfonso, et al. Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental. México: Institución Nacional de Ecología, 2005, pp. 329-343.

PERÚ ECOLÓGICO. El Cadmio y la Salud. 2012. {En línea}. {07-03-2020}. Disponible en: http://www.peruecologico.com.pe/lib_c23_t07.htm.

PLETCHER, D.; GREFF, R.; PEAT, R.; PETER, L. & ROBINSON, J. Instrumental Methods in Electrochemistry. 1st edition. Chichester: Horwood Publ. 2001.

QIN-YIN WANG, et al. A study on corrosion behaviors of Ni-Cr-Mo laser coating, 316 stainless Steel and X70 steel in simulated solutions with H₂S and CO₂. En: Surface and Coatings Technology. Netherlands: Elsevier. 2016, Vol 291, pp. 250-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.017>

RENAU-PIQUERAS, Jaime y FAURA, Magdalena. Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido. En: MÉNDEZ, Josefina; RODRÍGUEZ, Ana María y CERDÁN, María Esperanza. II Reunión Científica en Biología Celular y Molecular: técnicas de microscopía, micromanipulación y análisis de imagen. Coruña: Universidade da Coruña. 1994, pp. 73-92.

SAE AEROSPACE. Aerospace material specification: Plating, Cadmium (Electrodeposited). US: SAE Aerospace, 2004, p 15. AMS-QQ-P-416B.

SAE INTERNATIONAL. Aerospace Material Specification: Chromium Plating. Julio 2000. AMS-QQ-C-320.

SAE INTERNATIONAL. Aerospace Material Specification: Nickel Plating. Julio 2015. AMS-QQ-N-290.

SALAZAR-JIMÉNEZ, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). En: *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, No. 3, Julio-Setiembre 2015, p. 127-136

SI, J.J., et al. Corrosion behavior of Cr-based bulk metallic glasses in hydrochloric acid solutions. En: Corrosion Science. UK: Elsevier Ltd. 2016, Vol 107, pp. 123-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.026>

SKOOG, Douglas; HOLLER, James & NIEMAN, Timothy. Principios de análisis instrumental. 5TA ED. Madrid: McGraw-Hill. 2001. Citado por: CAMACHO PUEBLA, Ana Laura. Technological viewpoints: historical technology, materials and conservation: sem and microanalysis. En: Intervención. MÉXICO D.F.: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía. 2013, Vol.4, No.8.

SMITH, William F. & HASHEMI, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 5ta Ed. México D.F.: McGraw-Hill. 2014.

STEEL, W. Y. AISI 4130 Alloy Steel. {En línea}. {02-08-2017}. Disponible en: <https://www.westyorkssteel.com/alloy-steel/oil-and-gas/aisi-4130/>

THAO T. HA, (Nombres), et al. Heggland. Pleiotropic roles of Ca^{+2} /calmodulin-dependent pathways in regulating cadmium-induced toxicity in human osteoblast-like cell lines. En: Toxicology Letters. Suiza: Eurotox, 2016, Vol 260, pp. 18-27.

TORRES GONZÁLEZ, Julieta. Recubrimientos alternativos para el cadmio. En: La Crónica Diaria. {En línea}. {06-08-2016}. Disponible en: <https://cutt.ly/nuz5RU6>

TRALLERO, Rafael; ATIENZA, Ricardo y FROVEL, Malte. Evolución histórica de los trenes de aterrizaje en las aeronaves. En: Tecnología y Desarrollo. Perú: Universidad César Vallejo. 2013, Vol XI, p. 4.

TRISTANCHO, José Luis. Caracterización por Sales Fundidas de los Recubrimientos metálicos NiCrFeNbMoTiAl, NiCrAlY. Mediante técnicas electroquímicas. Chihuahua, México. 2011. p. 24. Trabajo de investigación (Doctorado en Ciencia de Materiales). Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

UNG HING TIONG & GRAHAM, Clark. The structural environment as a factor affecting coating failure in aircraft joints. En: Procedia Engineering. Netherlands: No.1, Vol 2, 2010, pp. 1393-1401.

UNIÓN EUROPEA, Consejo. REACH (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Reino Unido. 2006. Reglamento (UE), N°1, 1907/2006.

US AIR FORCE. Technical Manual: Application and removal of organic coatings, aerospace and non-aerospace equipment. US: US Air Force: 2010, p 19. TO 1-1-8.

US AIR FORCE. Technical manual Cleaning and corrosión prevention and control, aerospace and non-aerospace equipment. US: US Air Force, 2009, p. 45. TO 1-1-691.

TORABINEJAD, V., et al. Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings A Review. En: Journal of Alloys and Compounds. Netherlands: Elsevier BV. 2017, Volumen 691, pp. 841-859.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Curso de Fundamento de Ciencia de Materiales. Fundamentos de corrosión y protección. {En línea}. {16-05-2020}. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/trb12_3.html.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Servicio de Microscopia Electrónica. {En línea}. {11-05-2020}. Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/indexc.html>.

URUCHURTU, Jorge & RAMIREZ-REYES, J. Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión Impedancia Electroquímica. México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos. 2011. 77 p.

VÁSQUEZ GUTIÉRREZ, José Luis. Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo. Valencia, España. 2007. p. 3. Trabajo de investigación (Máster en Seguridad industrial y medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia. Programa oficial de posgrado

WALLANCE, W. HOEPPNER, D.W. & KANDACHAR, P.V. AGARD AG 278 Volumen 1. Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories. Toronto: North Atlantic Treaty Organization, 1985, p. 208.

WHITAKER, A.F. Aerospace Environmental Technology Conference.US: NASA, 1995, No. 3298. {En línea}. Disponible en: <https://cutt.ly/nuxwRim>

ZHANG, X.G. Galvanic Corrosion. En: *Uhlig's corrosión handbook* (3ª Edición). US: John Wiley & Sons, Inc. 2011. p. 126-143

ZHANG, Z.G., et al. Influence of Ni content on the structure and properties of Cr–Ni–N coatings prepared by direct current magnetron sputtering. En: *Thin Solid Films*. Switzerland: Elsevier. 2009, Volume 517, Issue 11, pp. 3304-3309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.014>